

CAPITOLUL 1. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

1.1. Noțiuni de proiectare a structurilor solicate prin oboseală

1.2. Proiectarea pentru prevenirea ruperii prin oboseală

1.3. Pași în proiectarea la oboseală

1.4. Mecanisme de distrugere prin oboseală

1.5. Reguli de bază privind proiectarea la oboseală

1.6. Estimarea duratei de viață

1.1. Noțiuni de proiectare a structurilor solicate prin oboseală

Se cunoaște faptul că, atunci când solicitarea este statică, o piesă sau o structură poate prelua sarcinile din funcționare dacă acestea nu depășesc o anumită valoare considerată maximă. Din practică s-a constatat faptul că dacă solicitarea este variabilă, ruperea poate interveni la valori mult mai mici ale sarcinii aplicate decât cea utilizată pentru solicitarea statică. Cele mai multe echipamente și componente structurale sunt supuse la sarcini repetate, fluctuante, a căror mărime este cu mult sub sarcina de rupere determinată prin încercare statică. Oboseala reprezintă un fenomen de degradare mecanică a structurii materialului atunci când o componentă ce lucrează în exploatare este sollicitată la valori inferioare limitei de curgere, *figura 1.1*. Marea majoritate a componentelor lucrează în domeniul 0-1 de pe curba caracteristică, până să se ajungă la limita de elasticitate σ_e . În această zonă deformările introduse în piesă sunt elastice.

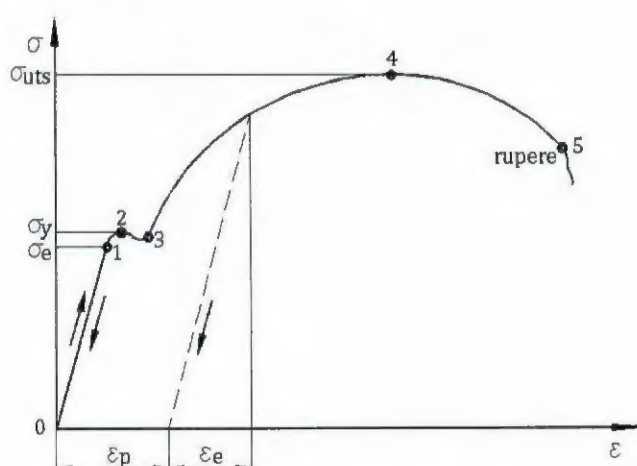


Fig. 1.1. Curba caracteristică a materialelor

Dincolo de limita de curgere σ_y , materialul capătă deformații plastice remanente, ϵ_p , incompatibile cu funcționarea în continuare a componentei respective. Așadar, prin solicitări repetate, materialul componentelor ce lucrează în domeniul elastic se degradează în timp ducând la apariția microdefectelor, care, ulterior, se vor transforma în fisuri ce se vor propaga până la rupere, dacă solicitarea continuă de un număr foarte mare de ori.

Exemple de echipamente și structuri supuse la încărcare prin oboseală includ: pompe, vehicule, utilaje, instalații de foraj, avioane, poduri, nave, etc. Fenomenul de distrugere prin oboseală a pieselor și structurilor este binecunoscut. Distrugerii prin oboseală au fost observate încă din secolul al 19-lea când s-au efectuat și primele investigații. O cercetare demnă de remarcat în acest domeniu a fost cea efectuată de August Wöhler. El a observat că o încercare unică, la o valoare a sarcinii mai mică decât sarcina de preluare statică a unei structuri, nu produce deteriorări ale acesteia. Dacă aceeași sarcină a fost repetată de mai multe ori poate duce la deteriorare completă. În acel moment ruperea prin oboseală era considerat un fenomen misterios datorită faptului că nu se putea vedea și pentru că distrugerea apărea fără a da un avertisment anterior. În secolul 20, am învățat că repetarea sarcinilor de încărcare poate conduce la startul unui mecanism de oboseală în material care va conduce la nucleerea unei microfisuri, dezvoltarea acesteia, și care, în cele din urmă se va finaliza cu distrugerea piesei sau structurii. Istoria structurilor de până acum a fost marcată de numeroase cedări la oboseală ale organelor de mașini, ale vehiculelor în mișcare, ale structurilor sudate, ale avioanelor, etc. De-a lungul timpului astfel de cedări au cauzat accidente catastrofale, cum ar fi explozii sau colapsul complet al unui pod sau a altor structuri mai mari.

O structură ar trebui să fie concepută și produsă în așa fel încât, pe durata funcționării acesteia să nu apară cedări. O proiectare judicioasă ținând cont de fenomenul de oboseală va trebui să asigure proprietăți satisfăcătoare cu privire la durata de viață, și siguranța în exploatare. Acestea presupun o mai mare atenție la detalii, alegerea unor materiale mai puțin sensibile la oboseală, îmbunătățirea suprafeței materialului prin tratamente termice, alegerea unor tipuri alternative de concentratori, niveluri mai scăzute ale tensiunilor de solicitare la sarcini dinamice. Alte tipuri de abordări în ceea ce privește proiectarea pieselor ce lucrează la oboseală sunt reprezentate de calculul duratei de funcționare (cu siguranță intrinsecă), proiectare în vederea prevenirii distrugerilor catastrofale sau în timp (protecție la coroziune), reducerea sarcinilor dinamice în serviciu, etc. Spectrul de posibilități este larg și este datorat numărului mare de variabile care afectează comportamentul la oboseală al unei structuri. Scenarii de proiectare „împotriva” oboselii sunt influențate de întrebările generate de beneficiar: de exemplu, îmbunătățirile legate de proiectare sunt rentabile pe termen lung, îmbunătățirile sunt previzibile?, etc.

Birourile de proiectare preferă proceduri standardizate de calcul pentru previziuni ale rezistenței la oboseală, ale duratei de viață, ale propagării fisurii și rezistenței reziduale. Procedurile standardizate pot fi utile, dar trebuie să se accepte faptul că ar putea implica un risc considerabil de rezultate nesatisfăcătoare. Principalul motiv îl reprezintă faptul că astfel de proceduri de calcul pornesc de la unele condiții generalizate, care, de obicei, nu sunt similare cu condițiile problemei. Peste aceste proceduri se intervine cu înțelegerea, experiența

și judecata inginerilor pentru a evalua semnificația rezultatelor acestora. Trebuie să se țină seama de faptul că astfel de predicții au o precizie și fiabilitate limitate. În cazurile în care apar unele îndoieli cu privire la rezultate, este util a se efectua teste la oboseală care să vină în sprijinul calculelor anterioare. De obicei un experiment este superior oricăror calcule teoretice. Afirmații de genul "Experimentele nu mint niciodată" sunt bine cunoscute.

Din păcate, un experiment dă rezultate aplicabile la condițiile aceluși experiment. Întrebarea care se pune este dacă respectivele condiții de testare sunt o reprezentare realistă a condițiilor în serviciu? Ca urmare, dacă proiectarea „împotriva” oboselii se face prin analize, calcule sau experimente, acest lucru necesită o cunoaștere profundă a fenomenului de oboseală în structuri și materiale și o mare varietate de condiții care pot afecta funcționarea la oboseală.

O diagramă bloc, ce cuprinde aspectele legate de procedurile de proiectare la oboseală este prezentată în *figura 1.2*.

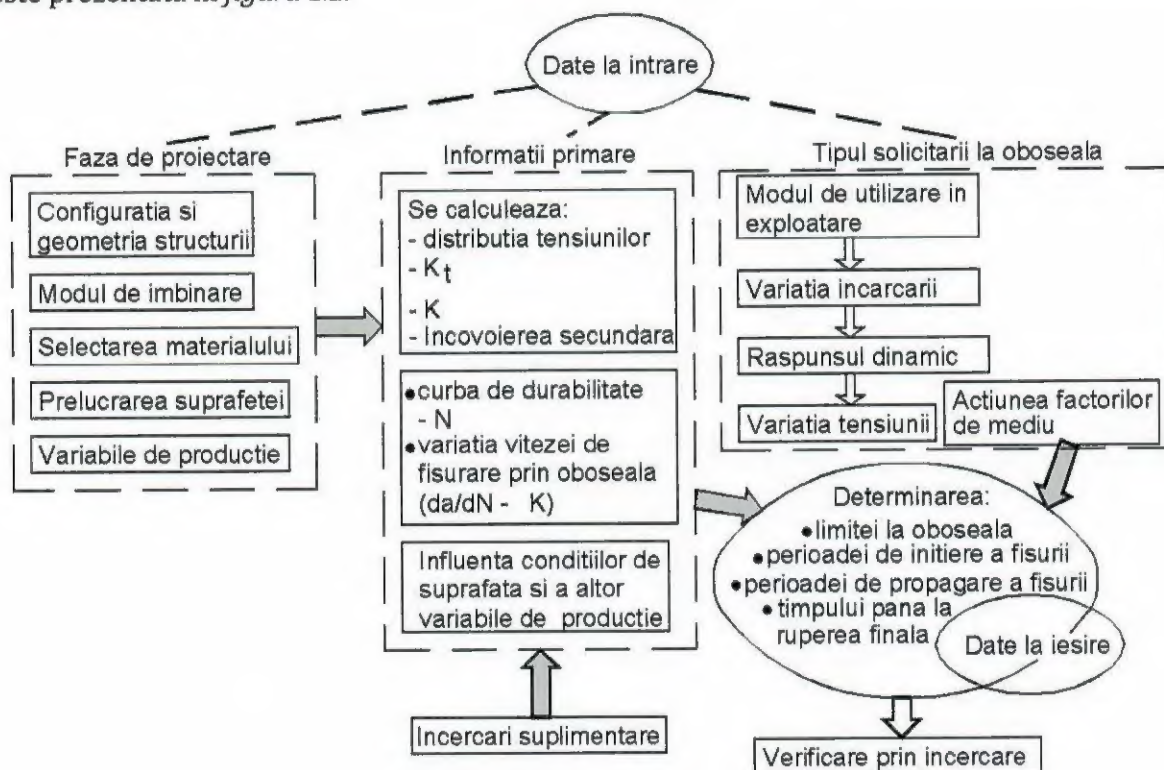


Fig. 1.2. Diagrama proiectării la oboseală a structurilor, [1]

Prima coloană conține teme majore de proiectare, în timp ce în coloana a doua sunt enumerate diverse aspecte ce conțin informații de bază. Informațiile din ultimul câmp al acestei coloane pot fi utilizate pentru selecția materialelor, tratamente de suprafață aplicate, variabile de producție, și, de asemenea, pentru probleme de proiectare în detaliu. Pentru a se ajunge la o evaluare a calității la oboseală a unei structuri, trebuie făcute anumite predicții. O altă condiție este aceea de a avea informații relevante cu privire la sarcinile de oboseală. Acest lucru presupune efectuarea unui număr de pași, începând cu considerații privind utilizarea structurii în serviciu, care sunt urmate de determinarea tensiunilor pentru zonele cele mai

solicitate la oboseală. O problemă specială o reprezintă modul de contabilizare a efectelor mediului. Coroziunea suprafețelor (interioare sau exterioare), eroziunea, umiditatea sau temperatura pot afecta în mod esențial comportarea la oboseală a componentelor afectate. Datele experimentale utilizate în previziuni sunt, în general, obținute în condiții de laborator în care frecvența solicitării este destul de mare.

1.2. Proiectarea pentru prevenirea ruperii prin oboseală, [2]

Au fost făcuți pași foarte importanți în ultimele patru decenii în privința înțelegerii și proiectării unor modalități de prevenire a ruperii prin oboseală ce apare la componente și structuri. Siguranța și fiabilitatea au devenit cuvinte complementare într-un moment în care partea economică a dictat folosirea metodelor celor mai sofisticate de proiectare, astfel încât să fie optimizată folosirea materialelor fără a crește posibilitatea apariției defectării componentelor. Grija inginerului proiectant se îndreaptă atât asupra structurii ca întreg cât și asupra componentelor care sunt expuse condițiilor de service, ceea ce înseamnă numeroase variații ale solicitării, ale tensiunii și deformației, ceea ce ar putea avea ca rezultat deteriorarea prin oboseală. Având în vedere nevoia de a produce un model economic prin reducerea masei, multe dintre vechile metode de proiectare au fost înlocuite cu altele mai noi și mai adaptate. În diferite perioade de timp erau impuse anumite obiective calculului la oboseală. Acum câteva decenii preponderent era calculul la durabilități nelimitate astfel încât o componentă, în orice domeniu ar fi lucrat, să reziste cel puțin $5 \cdot 10^6$ cicluri. Având în vedere producerea actuală de produse la preț cât mai mic dar și uzura morală accentuată a unor produse, acum se proiectează la oboseală pentru durabilitate limitată. În esență, se dorește ca produsul să fie atât de „suplu” încât, dacă e posibil, să cedeze imediat după trecere perioadei de garanție. Evident că, actualmente, nu se merge chiar atât de departe cu proiectarea. Totuși, dezvoltarea și a programelor de calcul performante conduce la un calcul cât mai precis. Înainte se luau în considerare doar factorii de siguranță ai componentelor, datorită lipsei de cunoaștere și înțelegere a efectelor interactive. Acești factori de siguranță nu mai sunt necesari odată cu dezvoltarea de programe soft computerizate. Aceste programe pot calcula, nu numai variațiile solicitării din componente, ci și tensiunile și concentrările de tensiune, fiind capabile să cuprindă volume mari de date ce cuprind istoricul solicitării în timp real. Aceste programe pot să combine respectivele date pentru a evalua evoluția oboselii întregului corp. Trebuie menționat că, mai ales în ceea ce privește fenomenul de oboseală, oricare rezultate obținute prin calcul sau pe baza utilizării programelor pe computer specializate, trebuie verificate experimental, mai ales atunci când nu se cunoaște din experiență comportarea materialului la condiții de exploatare. O combinație a solicitării mecanice variabile, cu temperatura (eventual variabilă) cu acțiunea factorilor de mediu, unii menționați anterior, poate conduce la urmări nefaste în ceea ce privește degradarea prin oboseală, fără ca toți acești factori să poată fi cuantificați simultan în cadrul unui program de calcul specializat și eventual conceput după anumite proceduri și relații de calcul standardizate. Obiectivul principal al acestei capitole este de a oferi o prezentare generală a diferitelor metode de

proiectare la oboseală și de a indica momentul în care se poate aplica fiecare dintre acestea. Ca regulă generală, sunt prezentate suficiente informații pentru a putea fi efectuate calcule, ținându-se cont de proprietățile materialului și de evoluția anticipată a oboselii. Deși sunt prezentate proceduri de anticipare a evoluției oboselii, proiectantul trebuie să stabilească evoluția oboselii pentru componenta proiectată.

1.3. Pași în proiectarea la oboseală

Metodele actuale de proiectare la oboseală pentru structuri și componente au evoluat din experiența bazată pe aplicarea graduală a noilor metode urmată de corelarea cu rezultatele bune la determinările experimentale. O privire de ansamblu a diferitelor trăsături ale procesului este arătată în *figura 1.3*, dar principiile ce au stat la baza tuturor elementelor pot fi rezumate prin următoarele trei etape de analiză, necesare pentru găsirea de soluții la probleme ce apar la solicitarea variabilă:

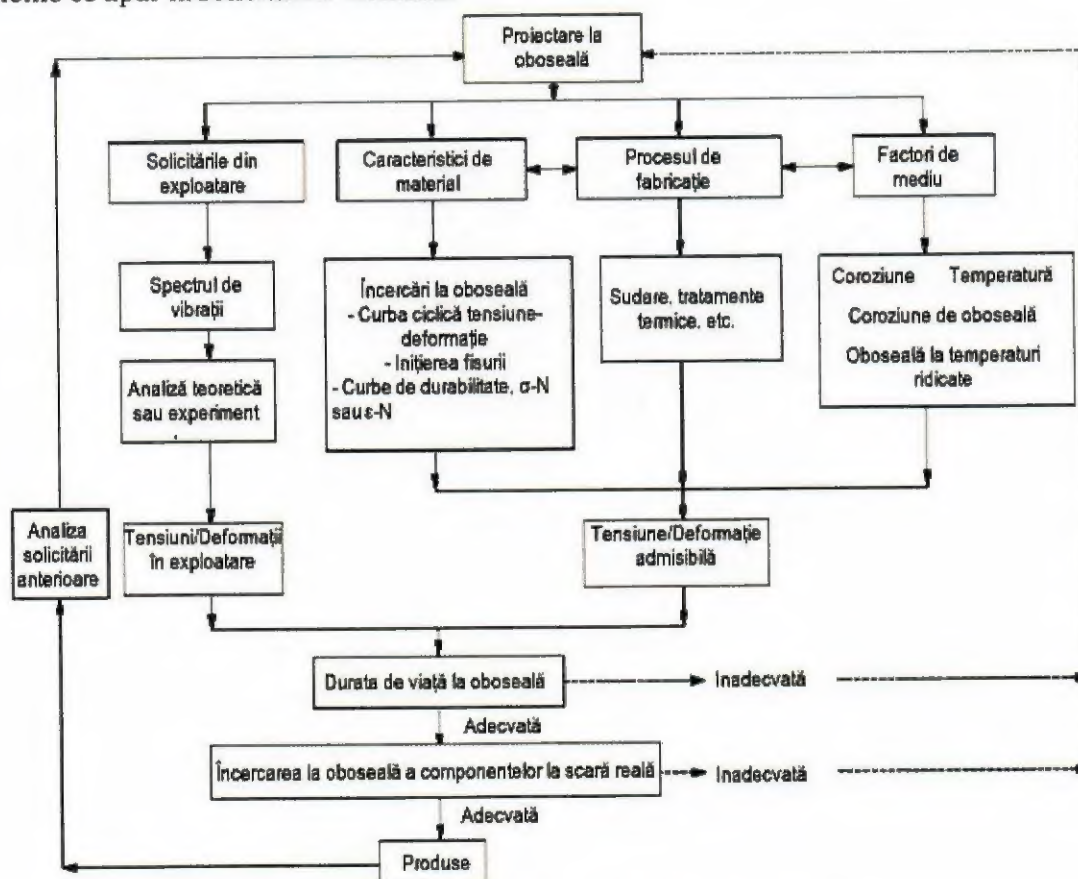


Fig.1.3. Diagrama proiectării la oboseală

1. Structura sau componența istoricului solicitării: forțele și momentele exterioare aplicate asupra unei structuri sau componente se regăsesc în material și cauzează solicitarea ciclică a locațiilor critice de oboseală. Este necesară cunoașterea numărului de cicluri, a direcțiilor și mărimilor tuturor solicitărilor exterioare semnificative. Decizia privind care solicitări intervin precum și determinarea mărimilor acestora poate fi un proces iterativ.

2. Geometria: trebuie făcută o analiză despre modul în care solicitările exterioare măsurate se translează în tensiuni sau deformări în puncte critice ale structurii – în general în zonele ce conțin concentratori de tensiune. Transformarea poate fi calculată prin reprezentarea tabelară a factorilor de concentrație a tensiunii, prin experimente fotoelastice, sau din rezultatele analizei elementelor finite.

3. Materialul: pentru materialele componente ale structurii trebuie să dispunem de influența solicitării de oboseală și de deformare ciclică. Informațiile despre deformarea ciclică sunt utilizate la modelarea materialelor, inclusiv la modele mai noi, multiaxiale, care urmăresc comportamentul tensiune-deformație în punctele critice. *Figura 1.3* arată că un anumit număr de factori influențează cele trei elemente de bază ale proiectării arătate mai sus. Exploatarea anterioară sau experiența în utilizare pot influența alegerea materialului sau pot sugera ajustarea nivelului de solicitare proiectat. Deformarea materialului poate fi influențată de mai mulți factori:

- modalitatea de prelucrare: la rece, prin sudare, detensionarea suprafeței;
- acțiunea mediului înconjurător ce poate produce coroziune, eroziune sau uzură;
- utilizarea piesei la temperaturi mari.

Efectele acestor variabile se exprimă prin schimbări ale curbei de tensiune-deformație. De exemplu, așa cum se observă la temperaturi mari intervine o coborâre a curbei caracteristice, pe când la temperaturi scăzute apare fenomenul de tranziție de la comportamentul ductil la cel fragil. Acest din urmă aspect se poate întâmpla și sub temperaturi de +5°C.

1.4. Mecanisme de distrugere prin oboseală

Fenomenul de oboseală a materialelor reprezintă o degradare în timp a structurii acestora, accentuată pe măsura menținerii în continuare a unei solicitări repetate. Există trei etape în degradarea structurală prin fenomenul de oboseală:

- inițierea degradării;
- propagarea unei microfisuri;
- ruperea finală.

În oboseala de scurtă durată a probelor încărcate axial (aproximativ $N_f < 100000$ cicluri), faza de inițiere a degradării cuprinde o perioadă foarte mică și în cea mai mare parte a perioadei se propagă o fisură de lungime mică. În oboseala pe termen lung, aproape de limita de oboseală, cea mai mare parte a duratei de viață este folosită pentru a dezvolta fisuri microstructurale, în timp ce faza de propagare de la nivelul unui grăunte până la ruperea finală are o durată foarte mică. Primele două stadii nu sunt ușor de determinat cantitativ. De regulă, în proiectarea la oboseală se consideră că defectiunea a intervenit imediat ce a fost inițiată o fisură sau aceasta a devenit vizibilă. În cele mai multe cazuri, durata propagării fisurii este ignorată, asigurând astfel un factor de siguranță care să împiedice inițierea oricărei degradări, fără a se ajunge în faza de propagare a fisurii. În cazul în care solicitările exterioare nu pot fi transferate către alte componente în timpul propagării fisurii, este posibil totuși ca

regiuni locale supuse deformărilor plastice reversibile să nu prezinte vreo urmă vizibilă de defecțiune înainte de survenirea ruperii finale în componenta respectivă. Astfel, detectarea unei fisuri nu poate fi folosită ca metodă de prevenire a defecțiunii în proiectarea la oboseală. Totuși, în industriile în care componentele au un cost foarte ridicat (spre exemplu pentru presele de ștanțare, recipientele sub presiune mică din industria petro-chimică ce nu prezintă pericol de explozie iminent sau de intoxicare cu produsele deversate), la care siguranța nu are importanță vitală, se poate utiliza tehnica analizei propagării fisurii pentru a estima durata de viață rămasă până la înlocuire.

Figura 1.4 prezintă tehnica cea mai utilizată în acest sens în industria autovehiculelor. Se utilizează estimarea comportării locale la tensiuni și deformații, fie pentru a calcula deteriorarea dată de parametrul ΔK — fie pentru calculul propagării fisurii. Ambele metode presupun că proiectantul analist poate să măsoare sau să simuleze comportamentul la tensiune-deformație în punctele critice de oboseală.

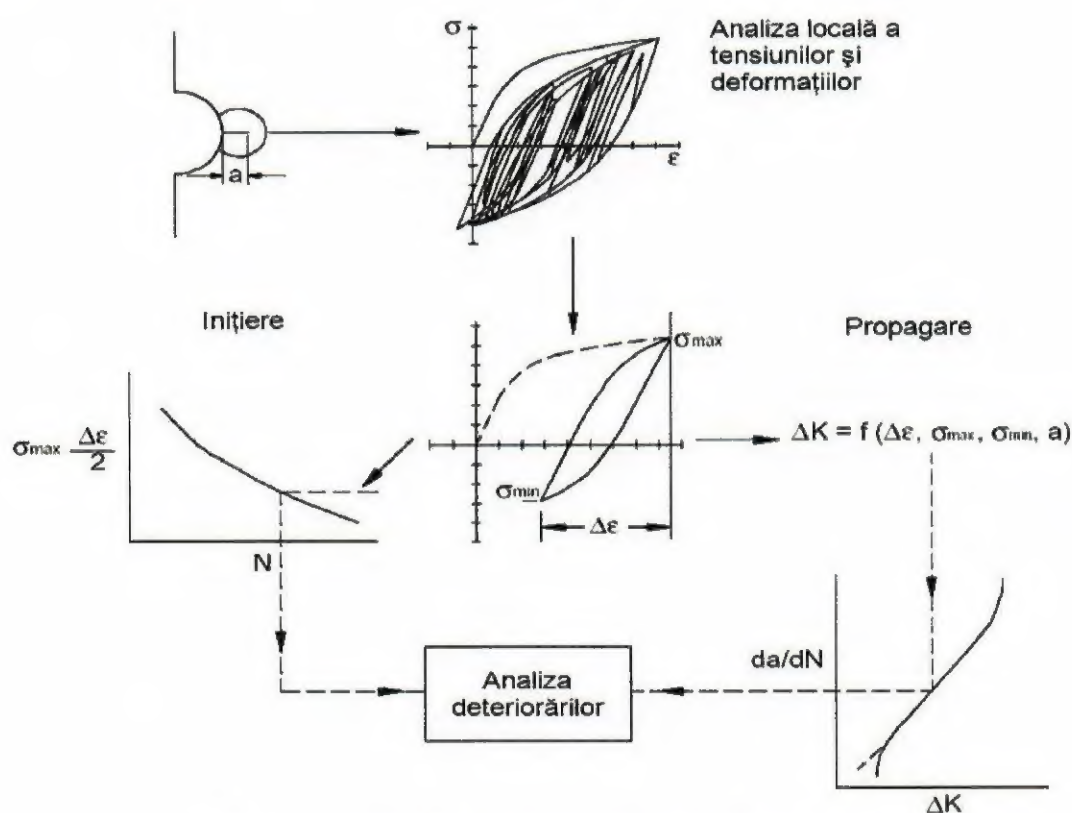


Fig. 1.4. Analiza locală a tensiunilor și deformațiilor

După ce curbele de histerezis individual au fost trasate și numărate, deteriorarea /defecțiunea este măsurată prin aplicarea parametrului Smith/Watson/Topper [3], care este dat de produsul dintre tensiunea maximă și amplitudinea deformării, $\sigma_{max} \Delta\epsilon$.

În metoda propagării fisurii, deteriorarea poate fi dată prin măsurarea lungimii fisurii propagate, lungime determinată și creată de fiecare curbă, respectiv curba de variație a da/dN , în raport cu ΔK , unde K reprezintă intensitatea factorului de tensiune la vârful fisurii

iar ΔK reprezintă variația acestui factor pe măsură ce are loc propagarea fisurii. Ambele metode conduc la determinarea duratei de viață la oboseală. În viitorul apropiat se așteaptă ca metodele bazate pe analiza tensiunilor și deformațiilor să domine analiza durabilității componentelor în mișcare, dar este foarte probabil ca metoda determinării vitezei de propagare a fisurii, sau o variantă a acesteia, să fie mai abordabilă și verificabilă din punct de vedere experimental.

1.5. Reguli de bază privind proiectarea la oboseală

Se folosesc trei metode pentru a efectua proiectarea inițială, ținând cont de fenomenul de oboseală, sau pentru a analiza componente deja utilizate un anumit număr de ore în exploatare:

- **Proiectarea bazată pe tensiune:** utilizează curba σ -N, respectiv tensiunea maximă în raport cu numărul cicluri de solicitare până la deteriorarea/avarierea/cedarea/defecțiunea probelor încercate în condiții de tensiune constantă și controlată. În aceste condiții, se poate caracteriza materialul și se determină valoarea tensiunii în apropierea locului cedării pentru a evalua durata de viață proiectată în cazul solicitării la oboseală. Istoricul solicitării exterioare, pentru determinarea numărului de cicluri și a deteriorării, trebuie evaluată în termenii concentratorilor de tensiune. Metoda nu se poate ocupa de evenimente care cauzează plasticitate locală și, ca urmare, este limitată la a proiecta curba de oboseală a materialului în zona *durabilităților ridicate*. Componentele pentru care nu se așteaptă să prezinte o plasticitate ridicată, pot fi proiectate folosind această metodă.

- **Metodă propagării fisurii:** este folosită pe scară largă în industria avioanelor pentru a măsura rezistența și durata de viață rămase a componentelor la care se produc fisuri neașteptate. De obicei, proiectarea inițială se bazează pe măsurarea tensiunii sau a oboselii locale dată de curba caracteristică tensiune-deformație și apoi se face verificarea rezistenței la propagarea fisurilor în eventualitatea că o fisură de oboseală scapă inspecției periodice obligatorii. O astfel de inspecție ar fi dificil de aplicat vehiculelor terestre, astfel încât, pentru acestea se aplică o proiectare mai conservatoare, care să permită deducerea lungimii sau a severității fisurii, pentru a preveni fisurile critice de oboseală.

- **Metoda analizei tensiunii/deformației locale:** mai sunt, uneori, numite tehnici „bazate pe deformare”, dar de fapt utilizarea lor presupune măsurarea atât a tensiunii locale, cât și a locației critice a acesteia. Metoda este folosită predominant pentru componentele și structurile din materiale fragile. Principalul element privind comportarea la oboseală îl reprezintă baza de date pentru materialele utilizate în mod obișnuit în construcția de mașini. Datele despre oboseala datorată deformării permite estimarea duratei de viață a unei componente prin analiza comportării la tensiune/deformare, [4]. Metoda presupune că în timp ce o componentă poate fi supusă tensiunii elastice nominale în întregime sa, în punctele de concentrare a tensiunii va apare o deformare locală plastică de la nivelul căreia se vor iniția fisuri locale care se vor propaga, conducând în cele din urmă la cedarea totală a componentei.

Foarte importantă în acest caz este ceea ce se întâmplă în aria de tranziție dintre zona deformată elastic și cea deformată plastic. Deși este posibil să fie proiectate componente care să se mențină sub nivelul tensiunii de curgere, constrângerile legate de greutate cer o durată de viață finită, care, la rândul ei, conduce la necesitatea unei metodologii de prezicere a duratei de viață în funcționarea la solicitare variabilă.

Metodologia prezentată în *figura 1.5* necesită definirea a două proprietăți sau relații: o relație între tensiune și deformare și o relație între deformare și durata de viață. Alți termeni sunt adesea introduși pentru a ajuta la înțelegerea deformării materialului și a comportamentului la oboseală, deformare elastică, deformare plastică, reveniri ale defectelor, variabilele fundamentale care sunt observate în cadrul încercării materialelor fiind tensiunea, deformarea și numărul de cicluri de solicitare. Toți ceilalți termeni sunt derivați din cele trei mărimi menționate.

Deoarece sunt doar trei variabile, trebuie definite doar două relații și nu are importanță prea mare care dintre ele. Ar putea fi, spre exemplu, relația σ -N sau ε -N dar, de obicei, sunt definite σ - ε și ε -N. În utilizarea actuală, unele dintre variabilele derivate sunt folosite pentru a exprima alte concepte, iar seturile redundante de ecuații/egalități potrivite în diferite moduri, pot cauza dificultăți de previzionare, referirea la variabilele fundamentale clarificând anumite problemele de ajustare.

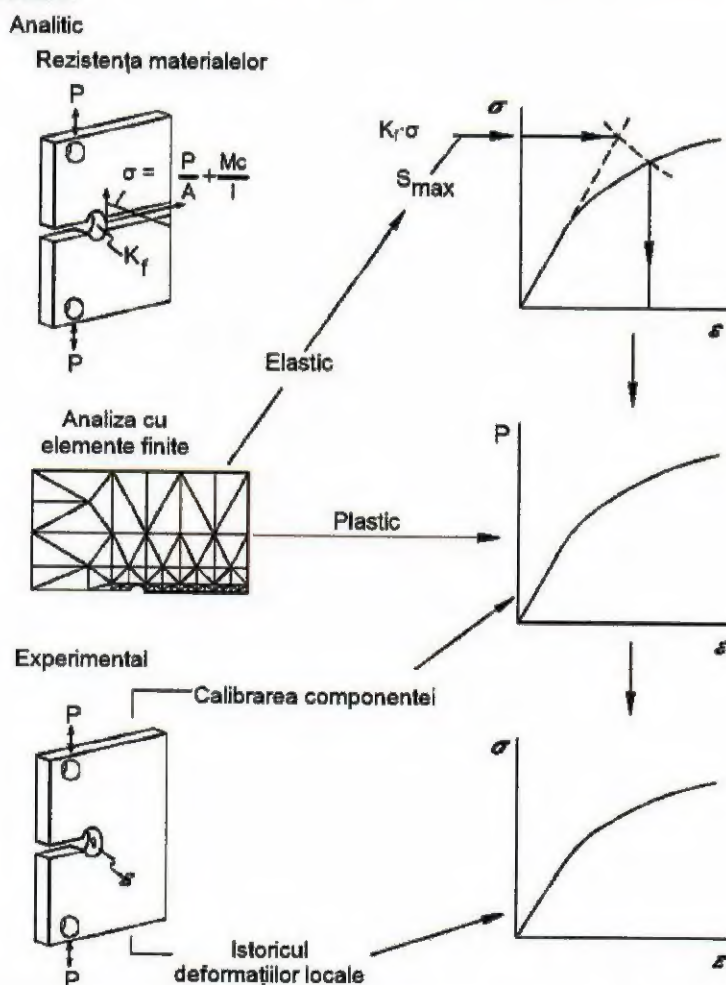


Fig. 1.5. Tehnici de evaluare a tensiunii locale și a deformărilor, localizarea zonelor critice

1.6. Estimarea duratei de viață

Există o serie de metode disponibile care utilizează datele legate de deformări pe baza cărora se încearcă să se estimeze durata de viață a componentelor. În funcție de gradul de complexitate acestea sunt:

1. **Încercarea structurilor/componentelor la oboseală:** atunci când estimarea tensiunii locale sau a locației defectului critic sunt dificil de făcut (de exemplu: structuri complexe, sudate sau lipite), această încercare poate fi oportună, în cazul în care structura în sine nu este foarte scumpă pentru a testa un număr suficient de probe cu amplitudine constantă a solicitării. Sarcinile sunt, de obicei, alese astfel încât să reproducă sarcinile de serviciu prognozate. Metoda devine dificilă atunci când condițiile reale de la frontieră nu se pot reproduce în mod fidel, și este foarte greu de utilizat atunci când probele sunt scumpe. Avantajul îl reprezintă faptul că piesele prezintă particularități de geometrie, având și concentratori de tensiune. Trecerea de la o încărcare cu amplitudine constantă la încărcări reale se poate face cu ajutorul criteriului Palmgren-Miner ce se va descrie ulterior în cadrul prezentului curs..
2. **Componente cu geometrie simplă:** într-o probă cu concentrator supusă la o solicitare specificată, valorile deformațiilor locale se pot determina pe baza analizei cu elemente finite sau pe baza determinării experimentale cu ajutorul tensometriei electrice rezistive. Deteriorarea cauzată de diferite cicluri este apoi însumată pentru fiecare eveniment. Modele efectuate cu ajutorul computerului privind comportamentul local plastic sunt utilizate pentru a delimita buclele de histerezis individual și pentru a calcula deteriorarea produsă de fiecare dintre acestea și mai apoi deteriorarea totală.
3. **Structuri complexe pe componente:** structurile complexe au mai multe zone în care se aplică solicitările variabile și mai multe zone potențial critice la oboseală. În ultimul deceniu, metodele folosite pe componente mai simple, descrise pe scurt mai sus, *au fost extinse* pentru a gestiona sarcinile aplicate la toate componentele din cadrul unei structuri complexe. Cheia a fost reprezentată de o combinație între *modelarea cu elemente finite și suprapunerea de efecte* în vederea calculării istoricului solicitărilor pentru fiecare element al structurii. Având acest istoric, se poate calcula deteriorarea prin oboseală pentru fiecare element al structurii.
4. **Cazuri de deformare multiaxială:** deși au fost făcute progrese semnificative privind estimarea comportării la oboseală sub încărcare multiaxială, este încă foarte problematic calculul exact al unei mărimi ce intervine la solicitarea de oboseală: tensiune, deformare, concentrator de tensiune, etc. Selectarea unui "eveniment" de oboseală, cum ar fi o buclă de histerezis închis, este o altă problemă, apărând dificultatea de evaluare finală a deteriorării, a curbei tensiune-deformare și a deformării componentelor. Deși sunt disponibile unele soluții, punerea lor în aplicare ar trebui să fie utilizate cu mare prudență și cu coeficienți de siguranță mari. Determinarea duratei de viață presupune criteriul liniar de cumulare a deteriorărilor (Palmgren-Miner), ce reprezintă o metodă de evaluare

a numărului de cicluri din cadrul solicitării reale și transformarea acestora în cicluri de solicitare de amplitudine constantă precum și o determinare a deteriorării cumulative care implică cunoașterea proprietăților la oboseală a materialului ce urmează a fi utilizat.

Bibliografie

- [1] Fig.1.2 [Jaap Schijve, *Fatigue of structures and materials* -2010, pg. 5].
- [2] Cap. 1.2 [***, Automotive steel design manual – August 2005, cap.3]
- [3] Smith, R.N., Watson, P., and Topper, T.H., "A Stress-Strain Parameter for the Fatigue of Metals," *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 4, 1970, 767-778
- [4] Topper, T.H., R.M.Wetzel, J.Morrow, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens," ASTM, J.of Materials V4 N1, March 1969, pp.200-209

CAPITOLUL 2. ETAPELE ȘI LOCAȚIA FISURĂRII DE OBOSEALĂ

- 2.1. Etapele degradării prin oboseală
 - 2.2. Degradarea inițială
 - 2.3. Propagarea fisurii
 - 2.4. Mecanismul propagării fisurii de oboseală
 - 2.5. Aspecte cristalografice ale inițierii fisurii
 - 2.6. Aspecte macroscopice și microscopice ale ruperii prin oboseală
 - 2.7. Inițierea fisurii de oboseală la nivel microstructural
 - 2.8. Aspectul fisurii în perioada de propagare prin oboseală
 - 2.9. Solicitare ciclică sub acțiunea tensiunilor normale sau tangențiale
-

2.1. Etapele degradării prin oboseală

Deformațiile elastice reprezintă deplasări reversibile ale atomilor în rețeaua cristalină și, ca valoare, sunt legate de distanța interatomică. *Deformațiile plastice* sunt rezultatul deplasării ireversibile a rețelei cristaline și se produc ca urmare a deplasării planelor suplimentare de atomi după anumite direcții preferențiale.

Componentele și echipamentele specifice ingineriei mecanice, supuse la solicitări variabile, se pot rupe chiar dacă tensiunea maximă aplicată este inferioară limitei de elasticitate a materialului. Solicitarea variabilă ce produce deformații plastice metalului poate cauza schimbări continue în material, atunci când se atinge o anumită stabilitate ciclică. Anumite materiale pot fi mai mult sau mai puțin rezistente la solicitare ciclică producându-se, după caz, o întărire sau o înmuiere a acestora. Unele materiale pot fi stabile la oboseală în timp ce la alte materiale se produce o degradare continuă. Pentru a înțelege răspunsul unui material la solicitarea variabilă în timp, trebuie să avem în vedere deformațiile plastice, dislocațiile și posibilitatea mișcării acestora în timpul solicitării.

Cele mai multe metale au o *structură policristalină* cu cristale și grăunți așezați ordonat. Fiecare grăunte are proprietăți mecanice particulare, o anumită direcție de aranjare atomică și proprietăți direcționale. Anumiți grăunți sunt astfel orientați încât este favorizată o mișcare a dislocațiilor pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Gradul de alunecare sau deformarea ciclică este relativă la structura cristalografică a metalului și este dat, în special, de ductilitatea acestuia. În metalele care au o comportare preponderent fragilă, dislocațiile sunt practic imobile iar alunecarea este limitată.

Procesului de degradare la solicitări variabile îi sunt caracteristice, în general, trei etape distincte, *figura 2.1*, în care se manifestă mecanisme diferite. Aceste etape sunt:

1. *Inițierea degradării/fisurii*, care se referă la incipiența acesteia în jurul unor defecte de material sau pe baza unor mecanisme care au loc la nivelul rețelei cristaline până când

microfisura capătă dimensiuni care permit detectarea prin procedeele de control nedistructiv. Ca urmare, acestei etape îi este caracteristică inițierea microfisurilor și extinderea acestora până la nivelul de macrofisuri. O serie de cercetări experimentale au evidențiat faptul că, această etapă este extrem de importantă, extinderea ei reprezentând până la 90% din durata de viață a unei piese;

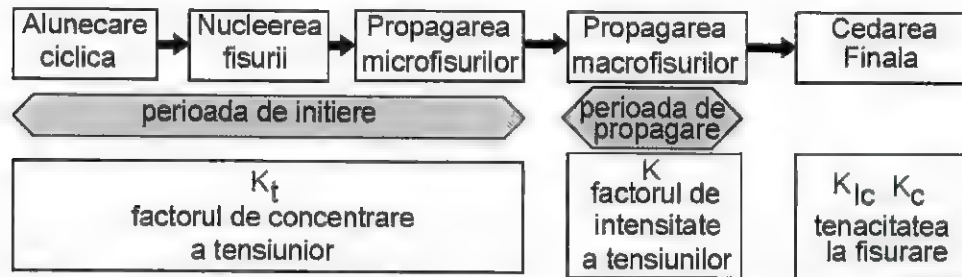


Fig. 2.1. Diferite etape ale fenomenului de oboseală și mărimi caracteristice

2. *Propagarea fisurilor* de oboseală. În cursul acestei etape macrofisura se extinde cu o viteză mai mare sau mai mică, în funcție de material și de intensitatea sarcinii aplicate. Apariția unor metode moderne de măsurare-detectare cum ar fi: microscopia electronică, tehnica curenților turbionari, măsurătorile pe baza diferenței de potențial, emisiile acustice, unde ultrasonice, etc., au permis elaborarea unor studii aproape complete asupra acestei etape.
3. *Ruperea finală* se produce atunci când lungimea fisurii atinge o valoare la care apare instabilitatea în extensia acesteia.

În figura 2.2 sunt prezentate moduri posibile de degradare în fiecare dintre etapele descrise mai sus.

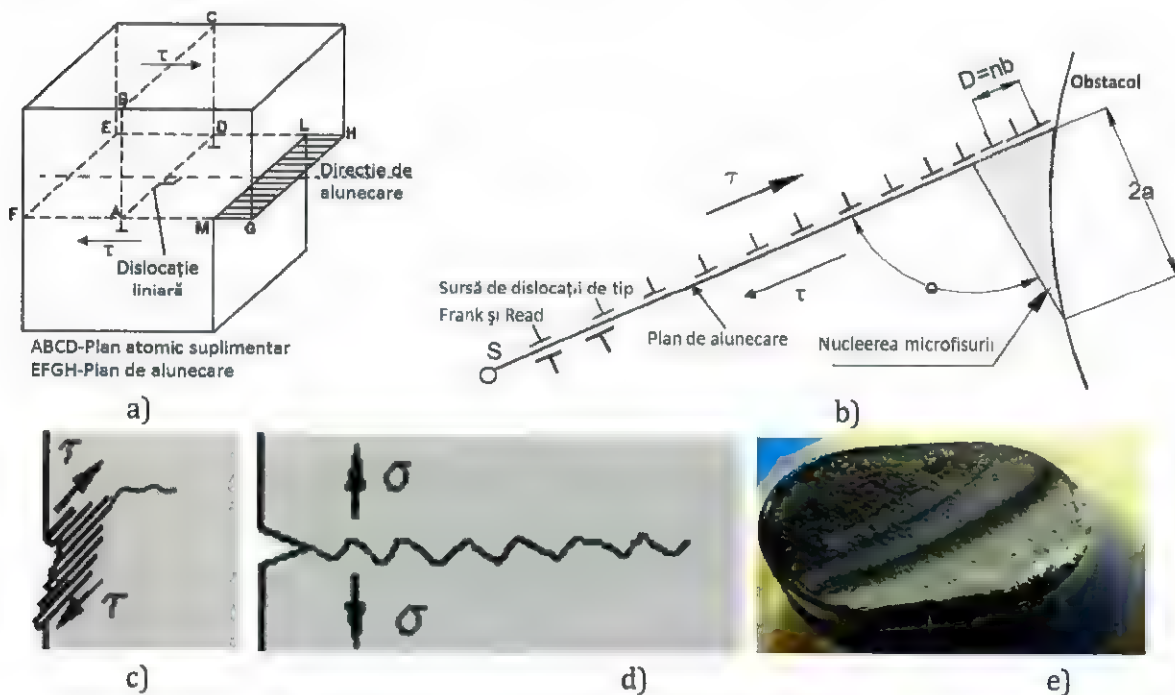


Fig. 2.2. Etape și moduri posibile de degradare

Astfel, în *figura 2.2a* este prezentată **alunecarea dislocațiilor** reprezentată de planul atomic suplimentar de atomi care se deplasează pe direcția de alunecare, în final rezultând zona liberă GHLM. În *figura 2.2b* este prezentat modul de **nucleere a microfisurii** pe baza mecanismului de alunecare a dislocațiilor și, fie a blocării acestora pe un obstacol (cazul din *figura 2.2b*) fie prin ajungerea unui tren de dislocații la suprafață, (cazul din *figura 2.2a*). După inițierea microfisurii pe baza mecanismelor de alunecare sub solicitarea cu tensiuni tangențiale τ , are loc propagarea în continuare a microfisurii, *figura 2.2c*. Urmează etapa în care se dezvoltă o macrofisură ce se propagă sub acțiunea tensiunilor normale σ , *figura 2.2d*. Dimensiunea fisurii se poate determina aici cu ajutorul metodelor de control nedistructiv. Cedarea finală are loc atunci când în suprafața rămasă nefisurată tensiunile ating valoarea de decoeziune a suprafeței, *figura 2.2e*.

2.2. Degradarea inițială

Inițierea și propagarea fisurilor de oboseală reprezintă o consecință a deplasării benzilor de alunecare. Aceasta implică deformări plastice ciclice, ca urmare a mișcării dislocațiilor. Oboseala apare la *amplitudini ale tensiunilor aflate sub limita de curgere*. La un astfel de nivel redus al tensiunilor, deformarea plastică este limitată la un număr mic al grăunților de material. Această micro-plasticitate poate apărea mai ușor în grăunții aflați la suprafața materialului, deoarece o parte dintre legături lipsesc. Pe de altă parte, tot la suprafață acționează factorii de mediu, de obicei un mediu gazos sau lichid. Ca o consecință, deformarea plastică în grăunții de la suprafață este mai mare decât în grăunții din interior așa că la suprafață deformarea plastică poate apare la tensiuni mai mici.

Alunecare ciclică presupune o tensiune de forfecare ciclică. La nivel microscopic tensiunea de forfecare nu este distribuită uniform în material. Tensiunea de forfecare la nivelul benzilor de alunecare cristalografice diferă de la grăunte la grăunte, în funcție de dimensiunea și forma acestora, în funcție de orientarea lor cristalografică și în funcție de anizotropia elastică a materialului. În unii grăunți de la suprafața materialului, aceste condiții sunt mai favorabile pentru alunecarea ciclică decât în grăunții de la interior. Dacă alunecarea apare într-un grăunte de suprafață, un prim pas de alunecare se va produce la suprafața materialului, a se vedea *figura 2.3a*. Un pas de alunecare implică faptul că o zonă de material nou este expus mediului înconjurător. Acest nou material de la suprafață va fi imediat acoperit cu un strat de oxid, aproape indiferent de mediul înconjurător, cel puțin pentru majoritatea materialelor structurale. Astfel de straturi foarte subțiri aderă puternic la suprafața materialului și nu pot fi îndepărtate cu ușurință. Un alt aspect semnificativ îl reprezintă faptul că, în timpul solicitării și producerii alunecării, în benzile de alunecare apar zone de „întărire”. În consecință, la descărcare (*figura 2.3b*), pe aceeași bandă de alunecare va fi prezentă o tensiune de forfecare mai mare, acum în direcție inversă. Alunecarea inversă se va produce de preferință în aceeași bandă de alunecare. Dacă alunecarea ciclică ar fi un proces complet reversibil, fenomenul de oboseală descris pe baza alunecărilor nu ar fi avut loc. În aceste condiții se pot menționa două motive care fac ca acest proces să nu fie reversibil. În primul

rând, stratul subțire de oxid nu poate fi pur și simplu eliminat din etapa de alunecare. În al doilea rând, apariția zonei de „întărire” din banda de alunecare nu este un proces reversibil. Ca urmare, alunecarea inversă, deși apare în aceeași bandă de alunecare, va avea loc pe planuri adiacente paralele. Acest lucru este indicat schematic în *figura 2.3b*. O aceeași secvență de evenimente pot apărea în al doilea ciclu, a se vedea *figura 2.3c* și *figura 2.3d*.

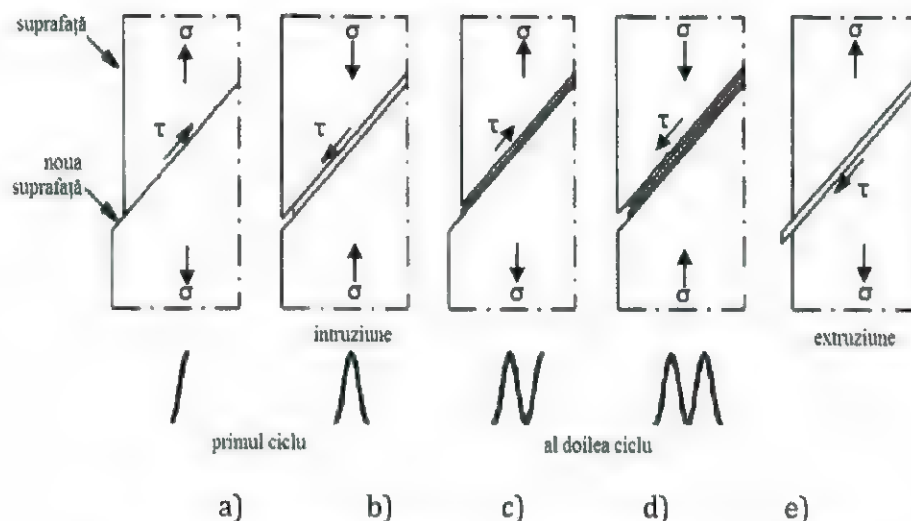


Fig. 2.3. Alunecarea ciclică ce conduce la nuclearea fisurii

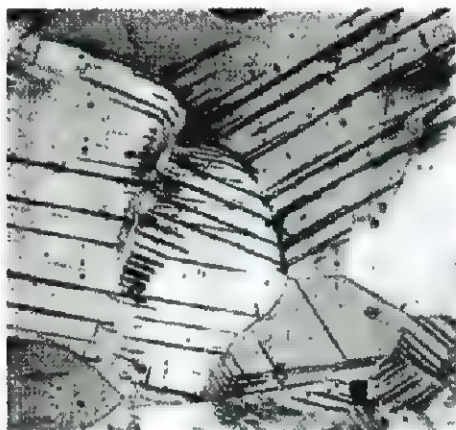
Figura 2.3 oferă o imagine simplificată de unde, totuși, se pot desprinde câteva observații importante:

- (I) un singur ciclu de solicitare este suficient pentru a crea o intruziune, microscopică în material, *figura 2.3b*, care de fapt reprezintă o microfisură, sau/și o extruziune, *figura 2.3e*;
- (II) mecanismul care apare în primul ciclu poate fi repetat în al doilea ciclu și în ciclurile următoare și poate provoca extinderea fisurii în fiecare ciclu;
- (III) inițierea primei microfisuri este de așteptat să apară de-a lungul unei benzi alunecare. Acest lucru a fost confirmat de mai multe investigații microscopice, a se vedea *figura 2.4*. Banda de alunecare din *figura 2.4a* este de fapt o microfisură așa cum se confirmă în *figura 2.4b*, după ce banda de alunecare este inițiată prin aplicarea unei deformări plastice de 5%. Ca urmare, o parte a acestei benzi de alunecare este deja vizibilă după o solicitare la oboseală cu o durată mai mică de 0,5%;

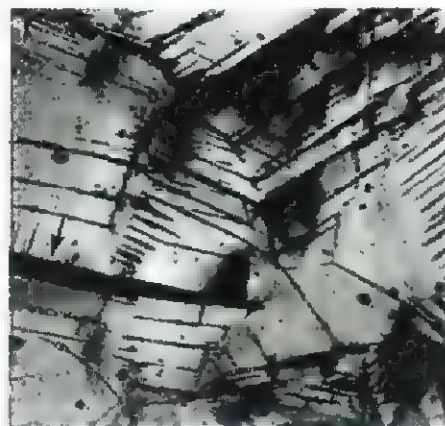
(IV) în *figura 2.3* schimbarea planelor de alunecare în timpul încărcării și descărcării conduce la apariția unei intruziuni, *figura 2.3d*. În cazul în care alunecarea inversă va avea loc la partea inferioară a benzii de alunecare, se obține o extruziune, a se vedea *figura 2.3e*. Din punct de vedere al potențialului energetic aplicat alunecării, intruziunea este o consecință mai probabilă a alunecării ciclice într-o bandă alunecare;

(V) mecanismul de intruziune prezentat în *figura 2.3b*, chiar dacă ar fi diferit sau mai complicat, presupune întreruperi ale legăturilor între atomi, ca urmare apare decoeziunea rețelei cristaline, fie prin tracțiune, fie prin forfecare, sau ambele. Decoeziunea apare în cazul în care, o bandă de alunecare pătrunde printr-o suprafață liberă. Ea poate apărea, de asemenea, la vârful unei fisuri nucleată prin oboseală. Întreruperea legăturilor la vârful fisurii

ar putea fi, de asemenea, cauzată de generarea unei dislocații în această zonă. Este de așteptat ca decoeziunea să fie accelerată de un mediu agresiv. Datorită legăturilor mai puține din zona suprafeței libere, alunecarea se poate produce cu ușurință aici, aceasta fiind o condiție favorabilă și pentru inițierea fisurii la suprafața materialului. Deoarece distribuția tensiunilor este neomogenă, de cele mai multe ori valoarea maximă a acestora se înregistrează chiar la suprafață. În plus, rugozitatea suprafeței conduce, de asemenea, la inițierea fisurii în această zonă. Alte deteriorări ale suprafeței, cu un efect similar, sunt reprezentate de ciupiturile produse de coroziune sau eroziune. Ca urmare, cea mai importantă concluzie ce se poate desprinde este: la solicitarea de oboseală, perioada de inițiere a fisurii este un fenomen care apare preponderent la suprafața materialului.



a). Benzi de alunecare



b). Apariția microfisurii
(deformare plastică cu 5%)

Fig. 2.4. Dezvoltarea benzilor de alunecare ciclice și a microfisurii într-o probă din cupru [1]
($\sigma_m=0$, $\sigma_a=77,5$ MPa, $N=2 \cdot 10^6$ cicluri)

2.3. Propagarea fisurii

Atâta timp cât mărimea microfisurii este de ordinul unui singur grăunte cristalin, microfisura este, evident, prezentă într-un material elastic anizotrop, cu o structură cristalină și un număr de sisteme de alunecare diferite. Microfisura contribuie la o distribuție neomogenă a tensiunilor la nivel microstructural, cu o concentrație a tensiunilor la vârful microfisurii. În aceste condiții pot fi activate mai multe sisteme de alunecare. Mai mult decât atât, în cazul în care fisura se propagă în anumiți grăunți, în grăunții învecinați apare o tendință de împotrivire la propagare ceea ce face ca benzile de alunecare să fie mai active. În aceste condiții, va fi tot mai dificil pentru benzile de alunecare să se orienteze după un singur plan de alunecare, paralel cu planele cristalografice. Ca urmare, ar trebui să apară plane de alunecare în direcții diferite. Direcția de propagare a microfisurii se va abate de la orientarea inițială a benzii de alunecare. În general, fisura are tendința să se propage în continuare pe o direcție perpendiculară pe direcția de solicitare, *figura 2.5*.

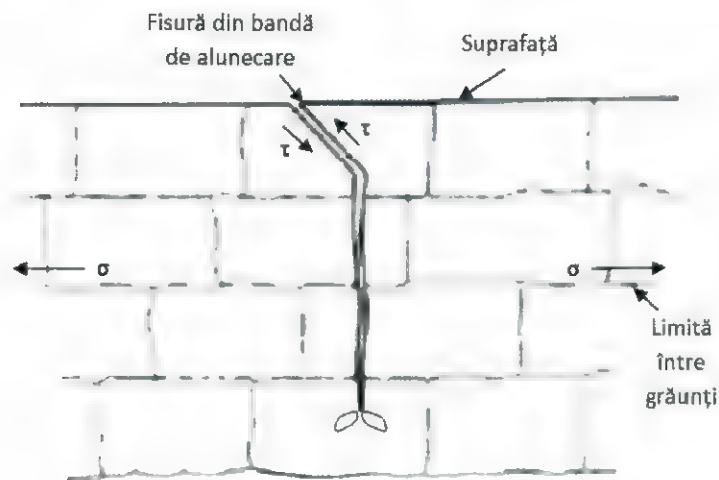


Fig. 2.5. Inițierea și propagarea microfisurii

Deoarece propagarea microfisurii depinde de ciclicitatea deformației plastice, barierele în calea benzilor de alunecare pot conduce la împiedicarea propagării fisurii. Acest lucru este ilustrat în figura 2.6.

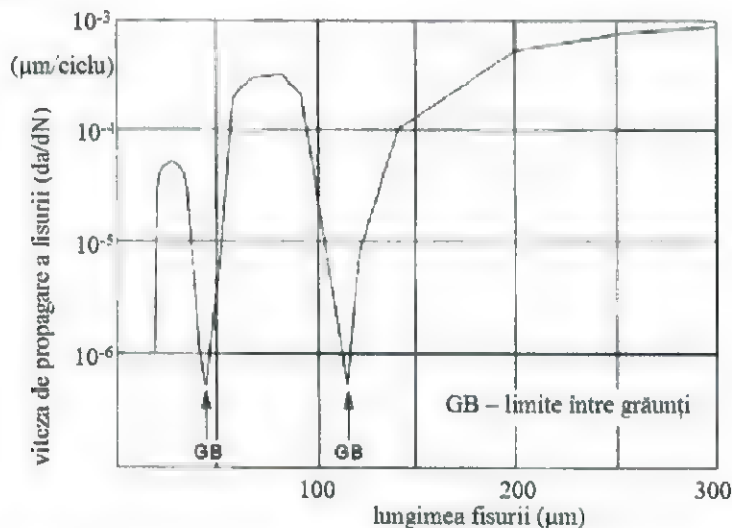


Fig.2.6. Efectul limitelor dintre grăunți asupra propagării fisurii într-un aliaj din aluminiu [1]

Viteza de creștere a fisurii, măsurată ca lungime raportată la un ciclu de solicitare, descrește atunci când vârful fisurii ajunge la limita dintre grăunți. După trecerea prin această limită, viteza de propagare a fisurii crește la trecerea prin următorul grăunte, dar scade din nou atunci când se apropie următoarea limită. După trecerea și a acestei limite, microfisura continuă să se propage cu o viteză aproximativ constantă.

În literatura de specialitate se regăsesc mai multe observații cu privire la propagarea inițial neomogenă a fisurii, care se extinde cu o viteză relativ mare la început care scade sau chiar devine zero din cauza barierelor structurale ale materialului. Cu toate acestea, lucrurile se schimbă în condițiile în care fisura se propagă printr-un număr suficient de grăunți, așa cum este indicat schematic în figura 2.7.

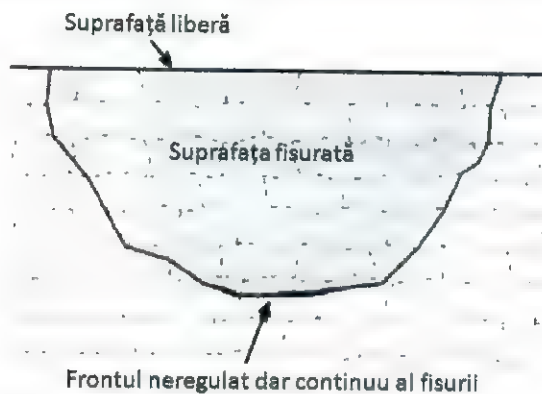


Fig. 2.7. Frontul fisurii trecând prin mai mulți grăunți

Deoarece frontul de propagare a fisurii trebuie să fie unul *coerent și continuu*, fisura nu se poate propaga pe direcții arbitrare prin grăunți, viteza de propagare a fisurii fiind dependentă de propagarea prin grăunții adiacenți. Această continuitate previne apariția unor gradienti în ceea ce privește viteza de propagare a fisurii de-a lungul frontului acesteia. De îndată ce numărul grăunților în lungul frontului fisurii devine suficient de mare, propagarea fisurii apare, mai mult sau mai puțin, ca un proces continuu de-a lungul frontului fisurii. Frontul fisurii poate fi aproximat cu o linie continuă de formă semi-eliptică. Viteza de propagare a fisurii va depinde doar de rezistența sau tenacitatea materialului. În acest moment, cele două aspecte enumerate mai sus și care țineau de caracteristicile suprafeței nu mai sunt relevante pentru propagarea fisurii în interiorul materialului. Acest lucru conduce la o a doua concluzie importantă: tenacitatea la propagarea fisurii, atunci când aceasta pătrunde în material, depinde doar de proprietățile intrinseci ale materialului, nemaifiind un fenomen care să depindă de caracteristicile suprafeței.

2.4. Mecanismul propagării fisurii de oboseală

În secțiunea precedentă, au fost discutate perioadele de inițiere și propagare a fisurii. Tranziția de la perioada de inițiere la perioada de propagare nu a fost încă foarte bine definită. Această perioadă nu poate fi dată în termeni cantitativi, dar, din punct de vedere calitativ, poate fi utilizată următoarea definiție: perioada de inițiere se presupune a fi încheiată când dezvoltarea în continuare a fisurii nu mai depinde de condițiile determinate de suprafața liberă. Acest lucru implică faptul că, propagarea fisurii începe atunci când, viteza și direcția propagării fisurii este controlată doar de rezistența intrinsecă a materialului la propagarea fisurii. Mărimea atinsă de microfisură la tranziția de la perioada de inițiere la perioada de propagare va fi semnificativ diferită pentru diferite tipuri de materiale. Tranziția depinde de barierele micro-structurale care urmează să fie depășite de către microfisura în propagare, iar aceste bariere nu sunt aceleași în toate materialele.

Deoarece, în perioada de inițiere a fisurii viteza de propagare a acesteia este, încă, scăzută, această perioadă poate acoperi o parte semnificativă din întreaga durată de viață a materialului supus solicitărilor variabile. Acest lucru este ilustrat de *figura 2.8* în care se arată

o imagine generalizată a etapelor de inițiere și propagare ale fisurii, care arată schematic procesul de dezvoltare a fisurii în funcție de durata de viață procentuală, $\frac{n}{N} 100$, cu n numărul de cicluri de oboseală real și N numărul de cicluri până la cedare. La cedare completă avem $n/N = 1 = 100\%$.

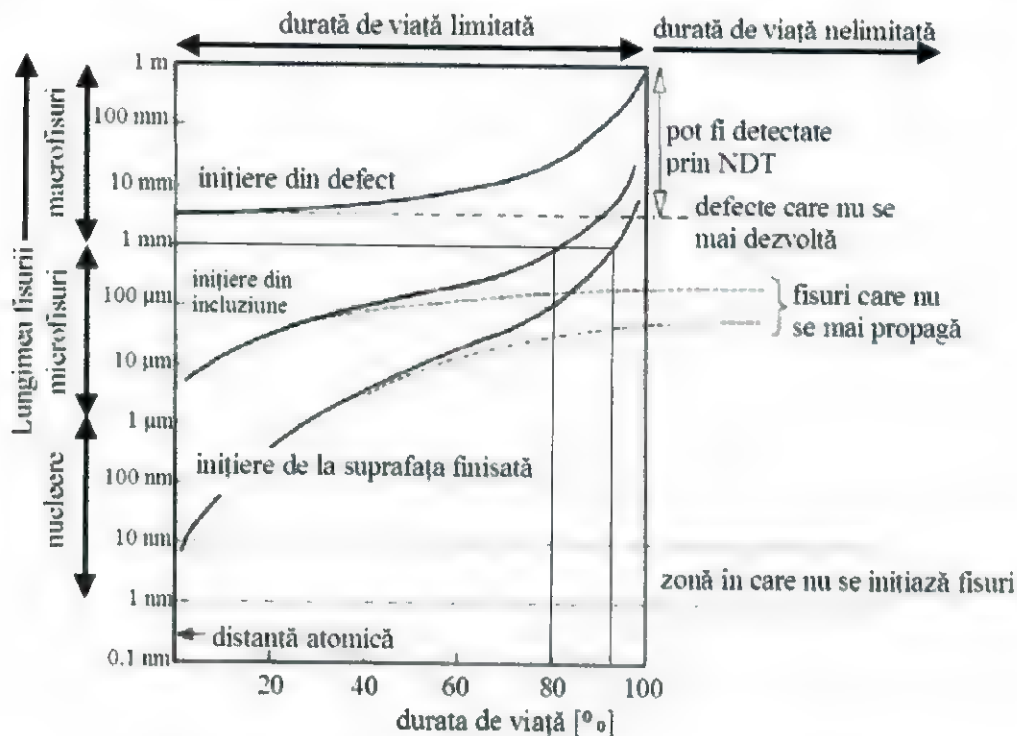


Fig. 2.8. Diferite scenarii de inițiere și propagare a fisurii

În figura 2.8 sunt prezentate trei curbe, toate în acord cu inițierea fisurii prin oboseală dar cu valori diferite a lungimii fisurii inițiale. Curba inferioară corespunde inițierii microfisurii de la suprafața materialului. În acest caz se poate aplica mecanismul de inițiere prezentat în figura 2.3. Curba de mijloc prezintă o fisură dezvoltată de la nivelul unei incluziuni existente în material. Curba de sus este asociată cu o fisură pornind de la un defect major de material, care, în mod obișnuit, nu ar trebui să fie prezent în material, cum ar fi defecte într-o asamblare sudată. Figura 2.8 ilustrează câteva aspecte interesante care sunt dezvoltate în cele ce urmează:

(I) ordonata, ce reprezintă lungimea fisurii, este trasată la scală logaritmică, variind de la 0,1 nanometri (nm) până la 1 metru. (1 nanometru = 10^{-9} m). Microfisurile, pornind de la suprafața liberă, pot avea o lungime de sub un micron ($1 < 1 \mu\text{m}$). Microfisurile ce se propagă de la nivelul incluziunilor au dimensiune similară cu cea a incluziunilor. Această dimensiune poate fi, încă, în gama de sub-milimetru. Numai pornind de la defecte macroscopice fisurile pot avea o lungime care să ne permită detectarea nedistructivă (NDT – Non Destructive Testing);

(II) cele două curbe inferioare ilustrează faptul că, cea mai mare parte a vieții de oboseală este cheltuită cu o dimensiune a fisurii mai mică de 1 mm, adică cu o dimensiune a fisurii practic invizibilă pentru metodele de detectare clasice utilizate;

(III) prin liniile punctate din *figura 2.8* se indică posibilitatea ca fisurile să nu se propage întotdeauna până la cedare. Acest lucru implică faptul că trebuie să fi existat bariere în materialul care a oprit propagarea fisurii.

Figura 2.8 prezintă scenarii generalizate legate de eventuale evoluții ale fisurii. Pentru a înțelege mai multe despre fenomenul de oboseală, în diferite condiții practice, trebuie avute în vedere câteva aspecte ale acestui mecanism, și anume:

- (1) natura cristalografică a materialului;
- (2) inițierea fisurii din incluziuni;
- (3) fisuri mici, bariere la propagarea fisurii, praguri la propagarea fisurii;
- (4) numărul de fisuri inițiate;
- (5) efectele condițiilor de suprafață;
- (6) propagarea macrofisurilor și existența striatiilor;
- (7) efectele mediului înconjurător;
- (8) solicitări de tracțiune și torsiune ciclică.

2.5. Aspecte cristalografice ale inițierii fisurii

Așa cum s-a arătat înainte, nucleerea inițială a unei microfisuri arată tendința acesteia de a se dezvolta de-a lungul unei benzi alunecare. Prin urmare, este de așteptat ca aspectul cristalografic al unui material să aibă o anumită influență asupra comportamentului mecanic în timpul perioadei de inițiere. Proprietățile cristalografice variază de la un material la altul. Ca o consecință, inițierea microfisurii depinde caracteristicile materialului. Aspecte care urmează a fi menționate aici sunt:

- tipul de rețea cristalină, anizotropie elastică, alotropie;
- sisteme de alunecare, alunecarea secțiunilor transversale;
- dimensiunea și forma grăunților;
- variația de orientare a cristalelor în raport cu grăunții rețelei cristaline.

Cele trei rețele cristaline bine cunoscute sunt: cubică cu fețe centrate (CFC) pentru Al, Cu, Ni și Fe- γ , cubică cu volum centrat (CVC) pentru Fe- α și Ti- β , și hexagonală pentru Ti- α și Mg. Comportamentul elastic și plastic al unui material depinde de structura sa cristalină, dar, chiar și pentru aceeași rețea cristalină, pot apărea diferențe mari. Anizotropia elastică poate varia în mod considerabil, așa cum este ilustrat de modulul lui Young, E , din tabelul de mai jos [1].

Material	$E_{\max}[111]$ [MPa]	$E_{\min}[111]$ [MPa]	E_{\max}/E_{\min}
Fe- α	284500	132400	2,15
Al	75500	62800	1,2
Cu	190300	66700	2,85

Anizotropia este mai mare pentru cupru, mai mică pentru Al, cu Fe- α (ferită) aflându-se într-o poziție intermediară. Oboseala apare, în general, la un nivel de tensiune redus, fără deformare macroplastică inițială. În fapt, definiția fenomenului de oboseală îl reprezintă degradarea materialului în condiții de solicitare variabilă în domeniul elastic. Ca rezultat al anizotropiei elastice, distribuția tensiunii de la grăunte la grăunte este neomogenă, cu reprezentarea schematică prezentată în *figura 2.9*, pentru care distribuția omogenă a tensiunii la nivelul unui grăunte este o aproximare. Neomogenitatea în distribuția tensiunii la nivelul grăunților este mai mică pentru aluminiu și aliajele sale, dar mult mai mare pentru oțel și cupru. Cei mai mulți grăunți în aliajele din aluminiu prezintă o distribuție similară a tensiunilor, în timp ce pentru oțel și alte materiale anizotrope, nivelul tensiunilor variază în mod semnificativ de la un grăunte la altul.

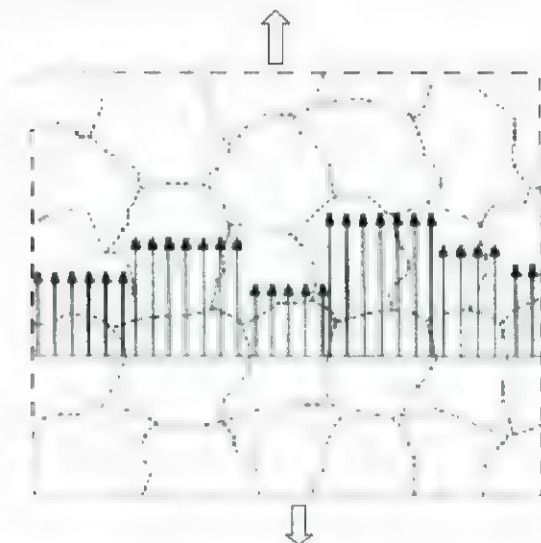


Fig. 2.9. Reprezentarea stării neomogene de tensiuni de la nivelul grăunților cristalini

Sistemele de alunecare sunt caracterizate de plane cristalografice pe care alunecarea apare pe direcții preferențiale. Sistemele de alunecare au fost studiate și sunt bine documentate în cărțile din domeniul științei materialelor. Posibilitatea de alunecare a unei suprafețe este importantă pentru mișcările dislocației în scopul de a ocoli obstacolele și de a continua să alunece pe planuri adiacente paralele. Alunecare planelor este mai ușoară în cazul în care energia stocată în material este mare. Aluminiul reprezintă un exemplu de alunecare facilă iar nichelul un exemplu de alunecare dificilă. Ca urmare, liniile de alunecare din Al sunt ondulate și ciclice și pot conduce la benzi de alunecare cu o grosime măsurabilă. În aliaje de Ni și Cu, liniile de alunecare sunt definite mult mai puternic ca fiind linii drepte. Mai mult decât atât, în cazul în care numărul sistemelor de alunecare activat este limitat, microfisurile pot persista mai mult timp în creștere de-a lungul direcțiilor cristalografice. Acest comportament poate continua până la o lungime a fisurii de ordinul a 1 mm, în timp ce pentru fisuri produse în aliaje de Al pot fi mai mici de 0,1 mm, caz în care se dezvoltă mai mult sau mai puțin pe direcție perpendiculară pe direcția de solicitare. Aceste observații arată că micro comportamentul în dezvoltarea și propagarea fisurii poate fi esențial diferit pentru diferite tipuri de materiale.

2.6. Aspecte macroscopice și microscopice ale ruperii prin oboseală

Fenomenul de oboseală este cauzat de solicitări variabile, iar forțele care cauzează cedări prin oboseală sunt substanțial mai mici decât cele care ar duce la o deformare plastică. Mai mult decât atât, acțiunea factorilor de mediu conduce la micșorarea rezistenței la oboseală a unui material. Rezerva de rezistență la oboseală va depinde atât de severitatea acțiunii factorilor de mediu cât și de numărul de cicluri de solicitare.

La solicitare statică, atunci când în interiorul materialului se introduce o tensiune ce depășește o anumită valoare (la materialele ductile - limita de curgere) se inițiază un fenomen de degradare care avansează în funcție de comportarea materialului: ductilă, fragilă sau intermediară. În *figura 2.10* se prezintă modurile de rupere (degradare) finală sub acțiunea diferitelor solicitări.

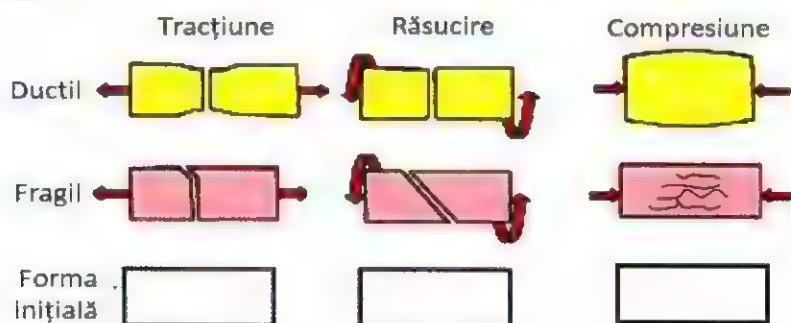


Fig. 2.10. Moduri de rupere la depășirea sarcinii de funcționare statică: comportament ductil și fragil

Până se se ajungă la ruperea finală, degradarea trece printr-un proces continuu ce depinde de mai mulți factori. Pentru solicitarea de oboseală, modul de inițiere, propagare și rupere finală, conduce la suprafețe rupte distincte, funcție de caracteristicile fiecărui tip de solicitare și funcție de concentratorul inițial. Odată ce fisurile sunt vizibile cu ochiul liber, frontul fisurii se propagă întotdeauna perpendicular pe direcția tensiunii normale σ . În *figura 2.11* și *figura 2.12* se prezintă planurile de rupere prin oboseală cauzate de patru tipuri de solicitări simple. Deoarece proprietățile secțiunii se vor schimba pe măsură ce fisura se propagă, este esențial pentru cel ce efectuează o expertiză de acest fel să se uite cu atenție la punctul în care s-a inițiat defectul și de a determina direcția solicitării. Starea suprafeței este una dintre cele mai importante aspecte în ceea ce privește analiza cedării pe baza căreia se face diferențierea între defecțiunea provocată de suprasarcină sau ruperea provocată de fenomenul de oboseală. În analiza stării suprafeței se pot lua în considerare următoarele aspecte: rugozitatea, concentratorii de tensiune, acțiunea corozivă și erozivă a mediului, umiditatea, diferențe de temperatură în raport cu straturile interioare, etc.

Atunci când piesa este supusă unei supraîncărcări (la solicitare statică dar nu numai), fisura se deplasează cu o viteză aproximativ constantă și, în aceste condiții, suprafața are un aspect uniform, fie rugos fie neted. Spre deosebire de solicitarea statică, la solicitarea variabilă fisurile induse traversează secțiunea ce urmează a se rupe la viteze din ce în ce mai mari. Din

acest motiv, aspectul suprafeței rezultat prin rupere este diferit în raport cu diferitele zone consacrate pentru fenomenul de oboseală: apariția primului defect, inițierea fisurii de la nivelul aceluși defect, propagarea în continuare prin oboseală și ruperea finală.

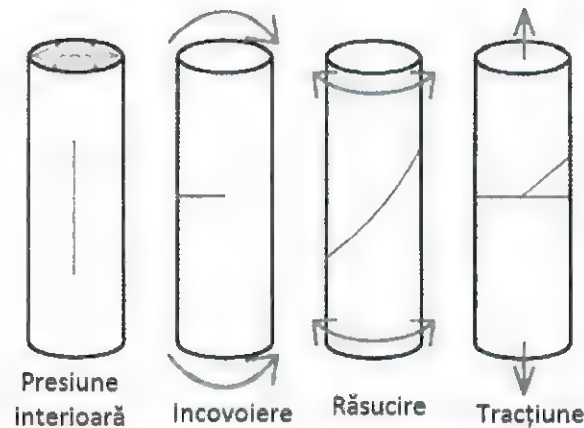


Fig. 2.11. Plane de fisurare cauzate prin oboseală de diferite solicitări



Fig. 2.12. Diferite tipuri de rupere raportate la solicitare

Examinând suprafața ruptă a unei piese se poate determina dacă materialul a cedat prin oboseală. Ruperea prin oboseală prezintă două regiuni distincte: una este netedă sau lustruită ca urmare a frecării flancurilor fisurii și este caracteristică etapelor I și II iar cealaltă este de tip granular datorită cedării rapide a materialului și este caracteristică celei de-a treia etape. Aceste regiuni ale unei suprafețe rupte prin oboseală se pot vedea în figura 2.13.

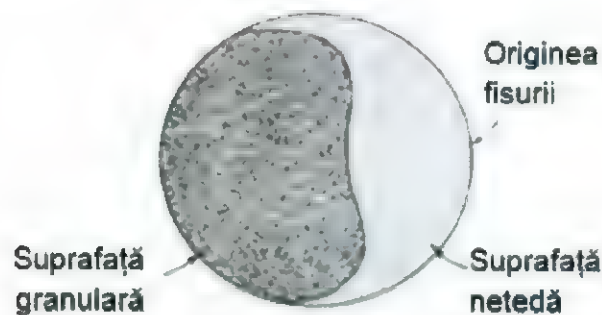


Fig. 2.13. Suprafață ruptă prin oboseală

Suprafața rugoasă indică ruperea fragilă (bruscă, finală) iar suprafața netedă indică propagarea fisurii.

Anumite suprafețe care au cedat prin oboseală prezintă așa-numitele striții, *figura 2.14a*. Acestea apar la materialele în care alternează perioadele de solicitare cu cele de repaus și în care variază intensitatea solicitării. Distanța dintre striții depinde de atât de perioada de timp de utilizare cât și de amplitudinea solicitării.

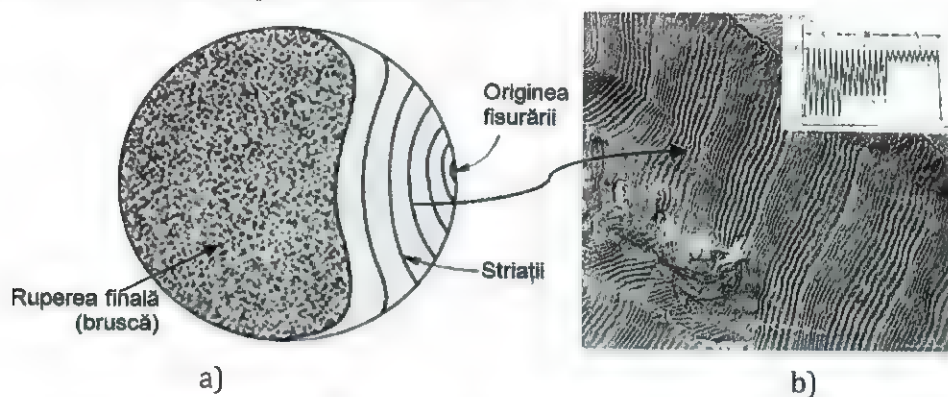


Fig. 2.14. a): Striții pe regiunea de propagare asociate cu variația în amplitudine și timp a solicitării; b): Exemplu de striții găsite pe suprafața fisurată

În *figura 2.15*, se prezintă aspecte ale suprafețelor rupte prin oboseală. În general, pe aceste suprafețe se disting: zona de inițiere, zona de propagare și zona de rupere finală. Aspectul acestor zone este diferit în raport cu mai mulți factori: cauza (tipul de concentrator) care a produs inițierea, dacă solicitarea se face la sarcini mici sau la sarcini mari, dacă materialul are o comportare ductilă sau fragilă. În orice caz, este evident că, în cele mai multe cazuri, zona de inițiere este opusă celei de rupere finală, bruscă. Mărimea zonei de rupere finală depinde de valoarea tensiunii introduse în material: dacă solicitarea se face la tensiune mică, suprafața ce rămâne pentru ruperea finală va fi, de asemenea, mică.

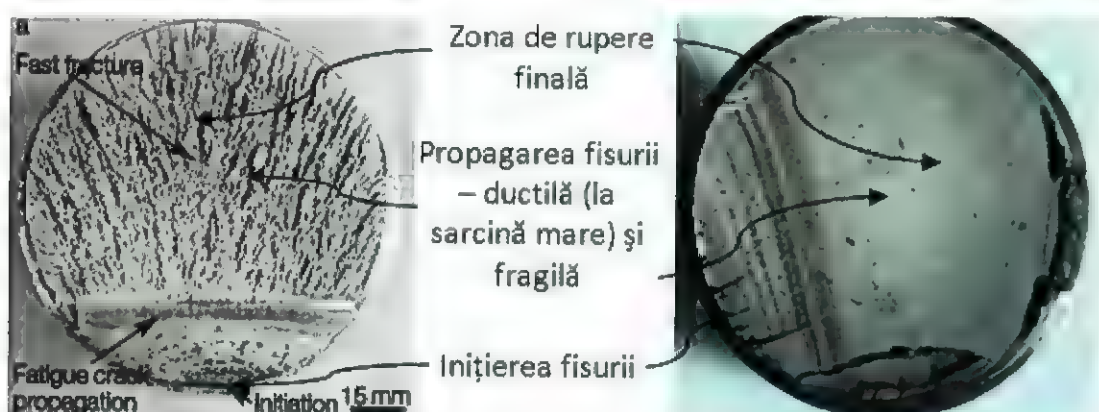


Fig. 2.15. Suprafețe caracteristice ruperii prin oboseală

O sumarizare a aspectelor suprafețelor de rupere [3] se prezintă în *figura 2.16* de unde se observă modurile specifice de rupere a epruvetelor supuse solicitării de oboseală în diferite condiții de geometrie și încărcare. Sunt prezentate ruperile la eforturi mari și eforturi mici

precum și epruvete fără concentratori de tensiune și cu concentratori de tensiune cu acuitate mai mare sau mai mică. Sunt prezentate cinci tipuri de solicitări:

- Tracțiune și tracțiune – compresiune;
- Încovoiere după un ciclu pulsant;
- Încovoiere după un ciclu alternant-simetrică plană (nerotativă);
- Încovoiere după un ciclu alternant-simetrică rotativă;
- Torsiune alternantă.

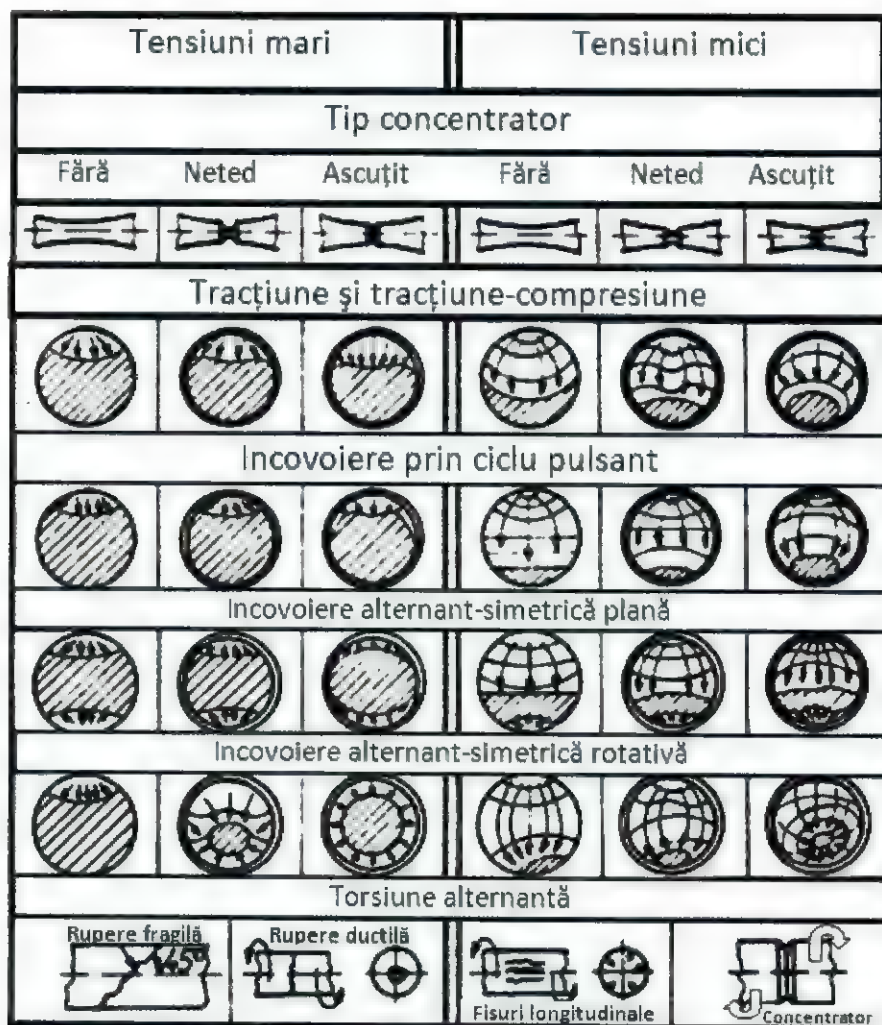


Fig. 2.16. Moduri specifice de rupere a epruvetelor supuse solicitării de oboseală în diferite condiții de geometrie și încărcare [3]

În funcție de caracteristicile luate în calcul în figura 2.12, în practică se pot distinge particularitățile prezentate aici. Trebuie menționat faptul că aceste particularități nu sunt exhaustive, experiența evaluatorului fiind esențială în aprecierea modului de rupere prin oboseală.

În figura 2.17 se prezintă câteva exemple de suprafețe rezultate prin ruperea pieselor supuse solicitării de oboseală:

a)- bolț rupt prin încovoiere; b) – șurub rupt la limita cu zona filetată; c) zona de inițiere la suprafață; d) – cele două zone distincte de rupere prin oboseală; propagarea fisurii (old) și ruperea bruscă (strălucitoare); e) și f) – zonele de inițiere, propagare și rupere bruscă în cazul solicitării la tensiuni mari și tensiuni medii; g) – inițiere din centru suprafeței; h) – trei zone distincte: inițiere (jos), propagare lentă (centru) și propagare bruscă (sus); i) – oboseală prin încovoiere; j) – concentratorul de tensiune este reprezentat de canalul de pană - inițiere; k) – rupere prin răsucire; l) – oboseală prin încovoiere plană cu două regiuni de propagare, jos și sus, și rupere finală centrală.

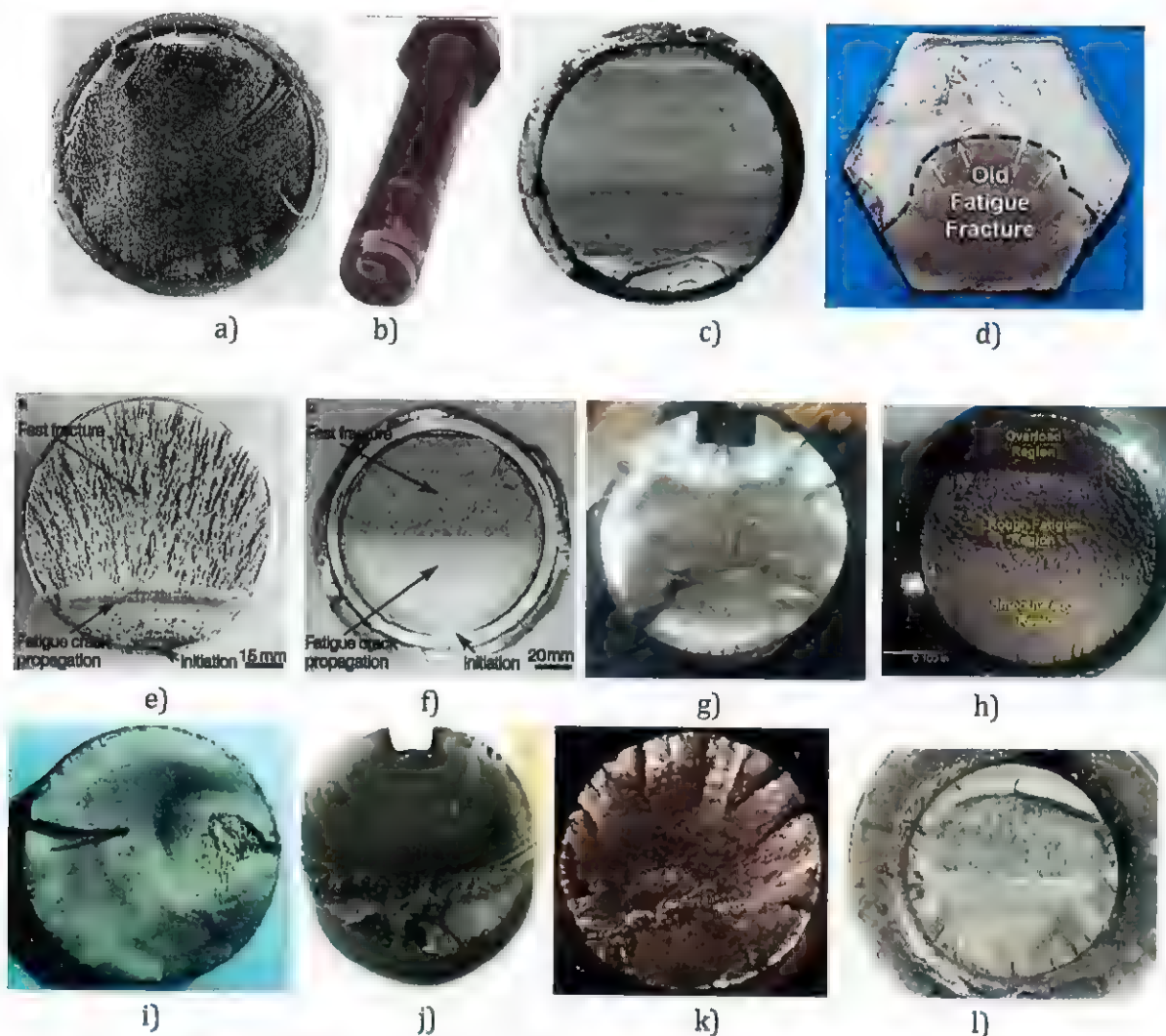


Fig. 2.17. Exemple de suprafețe rezultate prin ruperea la oboseală

2.7. Inițierea fisurii de oboseală la nivel microstructural

Abordarea la nivel microscopic a mecanismelor specifice acestei etape constituie obiectul multor cercetări de actualitate. Chiar dacă tensiunile nominale sunt mult mai mici decât limita de elasticitate a materialului, local, datorită efectului de concentrare a tensiunilor din jurul unor defecte, tensiunile pot depăși limita de curgere. În asemenea zone apar

deformații plastice în volume limitate de material unde se inițiază fisurile de oboseală. În *figura 2.18* se ilustrează diferite moduri de inițiere a fisurii și etapele de propagare după inițiere. Aceste fisuri vor conduce, în ultimă instanță, la cedarea materialului, dacă nu sunt detectate din timp și eventual reparate, sau scoaterea din funcțiune a piesei. Fisurile pot fi inițiate ca urmare a mai multor cauze, trei dintre acestea, care se pot observa în *figura 2.18*, fiind: *nucleerea (inițierea)* datorită planelor de alunecare pe direcții preferențiale, *crestături* la suprafață sau *defecte interioare*.

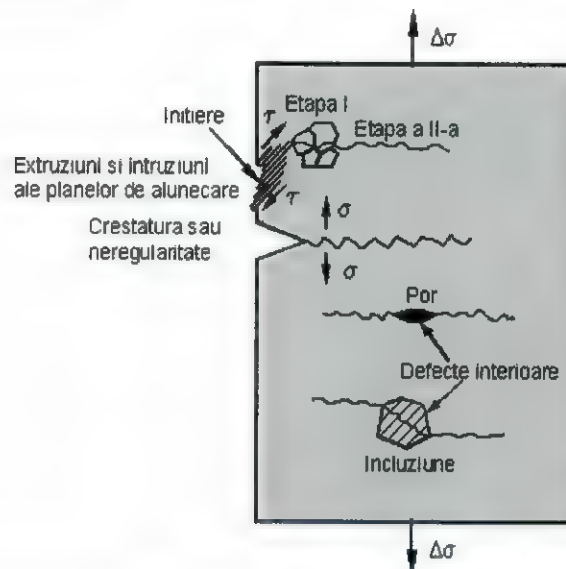


Fig. 2.18. Posibilități de nucleere și propagare a fisurilor

2.7.1. Microstructura și propagarea fisurilor de oboseală

Fisurile de oboseală, care se inițiază la nivelul benzilor de alunecare locale, tind să se dezvolte pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Această propagare este destul de mică, în mod obișnuit de ordinul câtorva grăunți. Propagarea microfisurilor este puternic influențată de caracteristicile de alunecare ale materialului, de mărimea grăunților materialului și de mărimea zonei deformat plastic din apropierea vârfului fisurii. Când mărimea fisurii sau zona deformată plastic de la vârful fisurii sunt mai mici decât valoarea corespunzătoare a 10 diametre de grăunți, propagarea fisurii de oboseală la materialele metalice, are loc predominant prin forfecare, fiind controlată de tensiunile tangențiale. Această comportare la fisurare se referă, în mod obișnuit, la propagarea fisurilor. Ca urmare, lungimea fizică cu care se propagă fisura datorită tensiunii tangențiale, poate diferi de la un material la altul depinzând de mărimea grăunților. În *figura 2.19a* se prezintă o microfisură formată în lungul planului de alunecare și care se propagă în interiorul a câtorva grăunți adiacenți. Se constată că microfisura nu se propagă într-un anumit plan ci își schimbă direcția atunci când trece în grăunții vecini. Totuși, din punct de vedere macroscopic, se poate considera că fisura se propagă pe direcția tensiunii tangențiale maxime. În *figura 2.19b* se prezintă aceeași fisură după mai multe cicluri de solicitare la oboseală. În vecinătatea vârfului microfisurii primare se pot vedea linii de alunecare suplimentare (în regiunea din cerc). Aceste linii nu există în *figura 2.19a*.

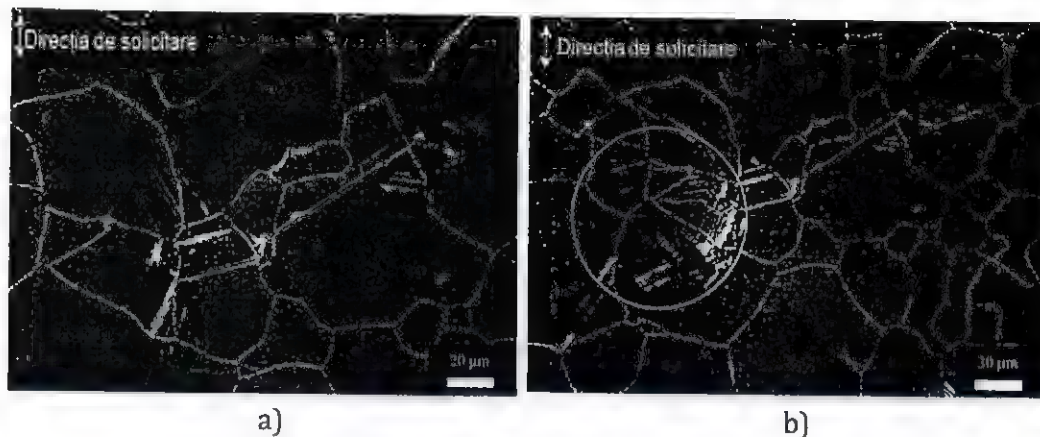


Fig. 2.19. Microfisură formată în lungul planelor de alunecare

Nu toate fisurile se inițiază în lungul benzilor de alunecare deși, în cele mai multe cazuri, benzile de alunecare sunt cel puțin indirect responsabile pentru microfisurile formate în metale. În condițiile sollicitării la oboseală, fisurile se pot iniția în apropierea *discontinuităților de material* sau uneori în imediata vecinătate a *suprafeței materialului*. Discontinuități la acest nivel, înseamnă: **incluziuni, particule de fază secundară și benzi de alunecare**. Deși fisurile se pot iniția de la nivelul acestor discontinuități, altele decât benzile de alunecare, acestea din urmă sunt influențate de granițele discontinuităților conducând la o localizare puternică a deformațiilor plastice care se transformă în cele din urmă în microfisuri. Microfisurile în metalele înalt rezistente sau cu comportare fragilă, sunt adesea formate direct din *incluziuni sau goluri* care se dezvoltă perpendicular pe planul tensiunii normale maxime. În figura 2.20 sunt prezentate câteva mecanisme de fisurare. Fisurile se inițiază adesea la *limitele grăunților*, fie la temperaturi ridicate fie atunci când avem amplitudini mari ale deformațiilor. În figura 2.20a se prezintă o fisură inițiată la limitele dintre grăunți. Această fisură s-a inițiat atunci când s-a menținut proba o anumită perioadă de timp la tensiunea maximă de solicițare. La temperaturi moderate, *precipitatele „întăresc”* limitele dintre grăunți. La temperaturi ridicate aceste precipitate pot slăbi rezistența *limitelor între grăunți* iar atunci când se introduce o perioadă de menținere la solicițare constantă poate apărea *fenomenul de fluaj*, în timp ce limitele fisurează (cavitează sau alunecă) producându-se propagarea fisurii intergranulare. Impuritățile aflate la limitele dintre grăunți pot crea o anumită fragilizare în metale conducând la inițierea fisurii și propagarea acesteia la nivelul limitelor dintre grăunți.

Fisurile pot fi inițiate, de asemenea, de la nivelul *incluziunilor, porilor sau altor neregularități microstructurale*. În figura 2.20b se prezintă o fisură inițiată la nivelul unei *incluziuni*. Fisura din partea dreaptă a fost influențată de deformația plastică localizată la nivelul grăunțului și propagată pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Fisura trece și prin incluziune, aceasta și cu fisura din partea stângă fiind orientate perpendicular pe direcția tensiunii normale maxime. Fisurarea incluziunii se produce la un nivel energetic scăzut.

În figura 2.20c se prezintă o fisură inițiată de la un *por* aflat la suprafața probei. Fisura se propagă simetric de la nivelul porului. Pe ambele direcții fisura se dezvoltă după tensiunea tangențială maximă. În figura 2.20d se prezintă o microfisură inițiată între două faze ale unui *aliaj*. Aici apare o delaminare sau fisurare interfacială între fazele α și β .

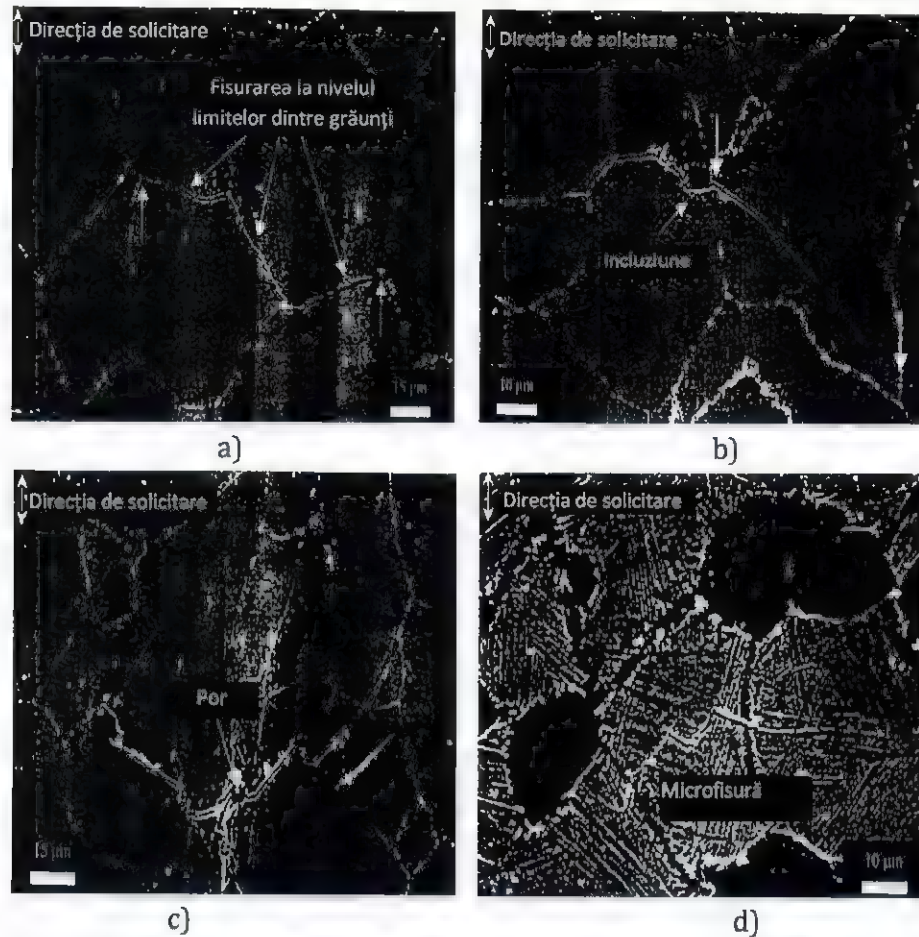


Fig. 2.20. Mecanisme de fisurare

Microfisurile pot fi prezente în metale înainte de solicitarea ciclică. Odată cu solicitarea la oboseală microfisurile tind să se dezvolte (coalescență) și se propagă perpendicular pe planul tensiunii normale maxime. Cele două etape de propagare a fisurii sunt în modul „forfecare” – etapa I și în modul „tracțiune” – etapa a II-a. Propagarea fisurii de oboseală este prezentată schematic în figura 2.21.

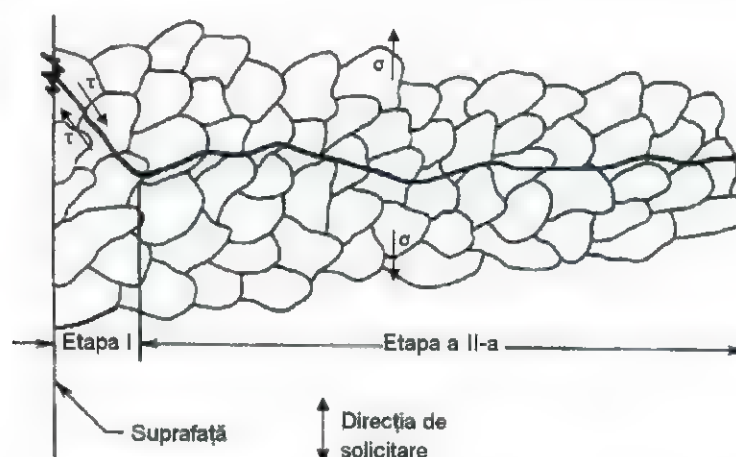


Fig. 2.21. Etapele propagării fisurii de oboseală

Se constată că fisura de oboseală se inițiază la suprafață și se dezvoltă apoi transversal pe grăunți. Inițial fisura se dezvoltă în planul tensiunii tangențiale maxime, ca urmare a deplasării benzilor de alunecare. Dezvoltarea în continuare a fisurii are loc perpendicular pe direcția solicitării. Cele mai multe fisuri traversează limitele grăunților, *figura 2.22* – fisuri transcristaline.



Fig. 2.22. Fisură transcristalină

Dezvoltarea microfisurilor prin limitele grăunților (intercristalină) depinde de caracteristicile de material, de încărcare, de condițiile determinate de mediul înconjurător, etc. În *figura 2.23* sunt prezentate trei din cele mai cunoscute moduri de fisurare la oboseală: a) formarea striatiilor, b) coalescența microgolurilor și c) microclivajul. Materialele care prezintă o comportare ductilă afișează adesea *striatiile* apreciabile și, de asemenea, o *coalescență a microgolurilor*. Undele din *figura 2.6a* sunt denumite striatii de oboseală. Aceste striatii nu se pot observa macroscopic întotdeauna din cauza frecării suprafețelor în timpul solicitării. **Striațiile nu apar, de obicei, în materialele înalt rezistente.** Unele studii presupun că fiecare striatie se datorește unui singur ciclu de solicitare și că acestea reprezintă o rotunjire a vârfului fisurii în timpul perioadei de încărcare-descărcare pentru un ciclu de oboseală.

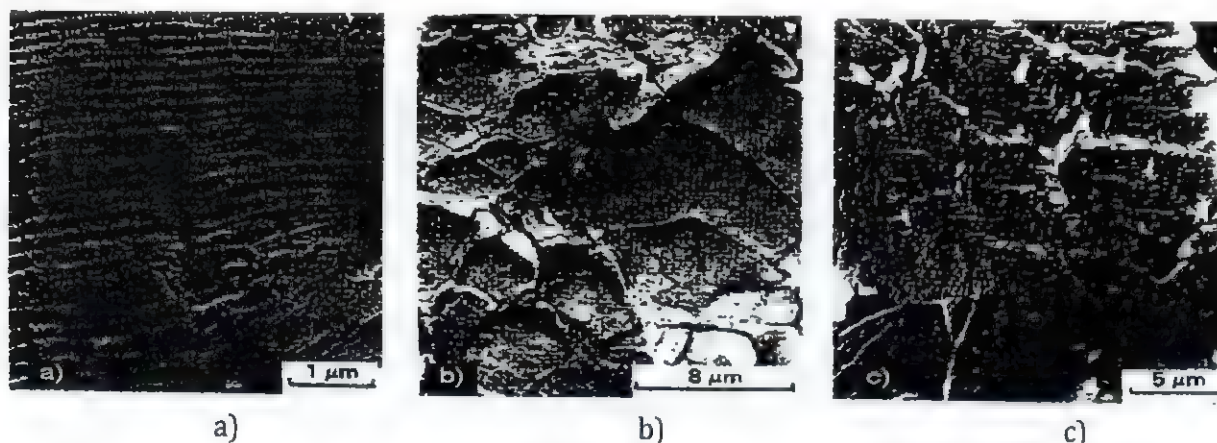


Fig. 2.23. Moduri de fisurare la oboseală

Coalescența microgolurilor are loc prin nucleerea acestora în timpul deformării plastice zonale. Coalescența microgolurilor este prezentată în *figura 2.23b*. Formarea acestor goluri, care evoluează în „cratere” de dimensiuni mai mari, produc fisurarea interfacială. Astfel,

mărimea și densitatea populației de „cratere” este relativă la distribuția incluziunilor sau a precipitatelor inerente din metale. Procesul coalescenței microgolurilor este considerat, în general, ca fiind unul cu consum energetic mare iar oboseala conduce, în acest caz, la viteze mari de propagare a fisurii. Suprafața fisurată ca urmare a coalescenței microgolurilor este în mod obișnuit neregulată și rugoasă punându-se în evidență fibrele materialului. Propagarea fisurii prin microclivaj este considerată un proces cu consum redus de energie. Probabil că acesta este mecanismul de fisurare pentru incluziunile fragile din *figura 2.23b*. *Clivajul sau microclivajul* implică fisurarea în lungul planelor cristalografice precise și este transcristalină. Suprafețele rupte prin clivaj sunt în general drepte, *figura 2.23c*. Fisurarea prin clivaj apare, mai degrabă, în metalele cu structură cubică cu volum centrat sau hexagonală, decât în cele cu structură cubică cu fețe centrate. Suprafața fisurată în urma clivajului este strălucitoare datorită reflectivității fețelor clivate. Clivajul are loc, în special, în materiale cu comportament preponderent fragil. Curgerea plastică împiedică formarea planelor de clivaj. Coalescența microgolurilor și clivajul sunt mecanisme de fisurare care pot apărea și la solicitarea statică și la cea de oboseală. Striațiile nu apar în condițiile solicitării exclusiv statice. Etapele specifice procesului de rupere prin oboseală sunt prezentate în *figura 2.24*.

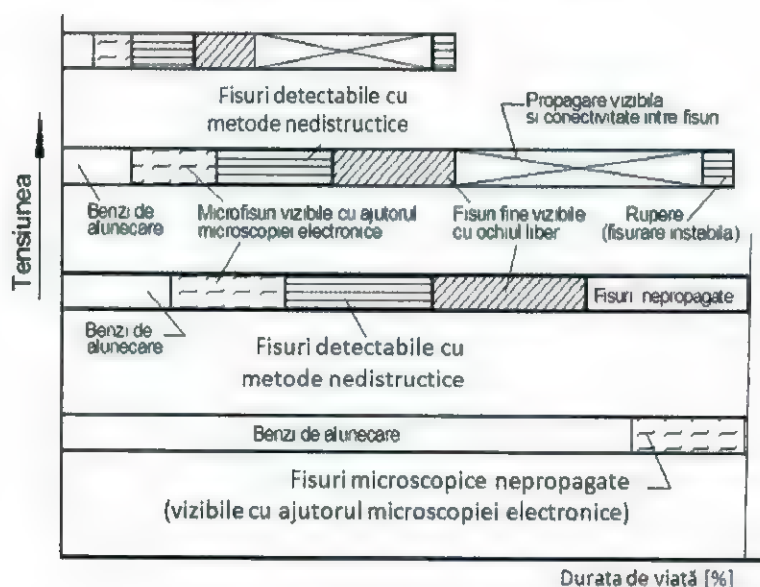


Fig. 2.24. Reprezentarea schematică a procesului de oboseală

În general, alunecarea apare prima, urmată de apariția fisurilor fine care pot fi observate numai cu ajutorul microscopiei electronice. Fisurile continuă să se dezvolte sub acțiunea solicitării ciclice și pot deveni vizibile cu ochiul liber. Fisurile tind să se combine până când se reduc la câteva macrofisuri majore. Aceste fisuri (sau fisură) ating mărimea critică iar ruperea se poate produce brusc. Dacă tensiunile au mărime mare se poate grăbi apariția tuturor acestor procese. Fisurile pot fi stopate dacă întâlnesc un câmp de tensiuni remanente de compresiune. Pe de altă parte, fisurile se pot dezvolta spre defecte cu severitate mare întâlnite în drumul lor. În general, oboseala constă în inițierea fisurilor, propagarea acestora și în final cedarea materialului. La nivele mari ale tensiunilor, o bună perioadă din durata de viață totală

este asociată cu microfisurarea și propagarea macrofisurilor. La nivele mici ale tensiunilor o mare parte din durata de viață este inițierea și propagarea microfisurilor.

Fizicienii sunt interesați de nivelul atomic al problemei, ca urmare de formarea și propagarea microfisurii. Metalurgiștii presupun că defectul deja există în material ca urmare a proceselor tehnologice de fabricare. Inginerul proiectant ia în considerare fisura doar atunci când aceasta poate fi detectată cu anumite metode. Astfel, sfârșitul etapei de inițiere se consideră de diferite discipline în mod arbitrar. Pentru a elimina această dificultate, inginerii trebuie să gândească în termenii inițierii fisurii urmată de propagarea acesteia spre nivelul de macrofisură și transformarea într-o rupere instabilă. Cedarea la oboseală poate fi prevenită prin inhibarea inițierii și propagării fisurilor. Din perspectiva proiectării, condițiile care favorizează o bună rezistență la inițierea și propagarea fisurilor de oboseală pot conduce la o rezistență scăzută la propagarea macrofisurilor și invers. De exemplu, grăunții fini tind să ofere o bună rezistență la inițierea și propagarea microfisurilor. Limitele dintre grăunți tind să stopeze sau să deflece fisura reducând astfel viteza de propagare a acesteia. Materialele cu grăunți grosolani tind să producă o fisură prin clivaj cu aspect neregulat.

2.8. Aspectul fisurii în perioada de propagare prin oboseală

Așa cum s-a discutat înainte, în perioada de propagare fisura nu mai este afectată de condițiile impuse de suprafața materialului ci doar de caracteristicile intrinseci ale materialului în volumul său. De obicei, în această perioadă, fisura se propagă pe direcție perpendiculară cu tensiunea normală. În condițiile de încărcare uniaxială în probe simetrice, va rezulta că direcția de propagare macroscopică a fisurii va fi perpendiculară pe direcția de încărcare. După ce fisura s-a depărtat de suprafața liberă, vor apărea deformații prin alunecare prezente în mai multe plane. *Figura 2.25* prezintă o vizualizare schematică a unui mecanism posibil pentru extinderea fisurii pe perioada unui ciclu de solicitare.

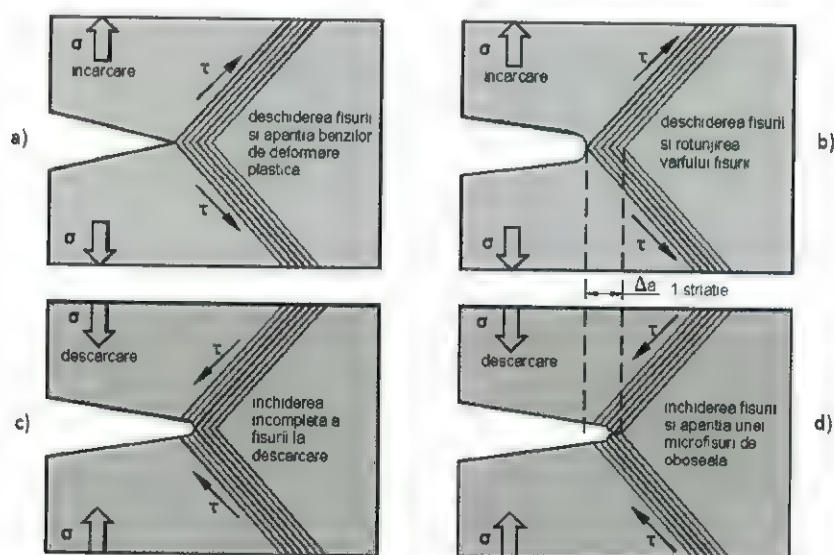


Fig. 2.25. Propagarea fisurii în cadrul unui singur ciclu de solicitare

În timpul încărcării fisura va fi deschisă de deformările plastice care apar la vârful creștăturii sau defectului inițial. În *figura 2.25* deformările plastice apar pe două sau mai multe sisteme de alunecare simetrice. Analiza tensiunii într-un unii solid cu o fisură propagată indică faptul că zonele de alunecare din *figura 2.25* sunt, într-adevăr, zone cu tensiune de forfecare maximă, atât în timpul încărcării, *figurile 2.25a* și *2.25b* cât și în cel al descărcării, *figurile 2.25c* și *2.25d*. În timpul încărcării, deformarea prin alunecare va cauza propagarea fisurii. Pentru macrofisuri, extinderea acestora implică decoeziunea rețelei cristaline, care trebuie asociată cu dislocațiile ce apar la vârful fisurii. Pare plauzibil faptul că extinderea fisurii are loc în fiecare ciclu de încărcare, așa cum este prezentată în *figura 2.25*.

Deformările prin alunecare nu sunt complet reversibile datorită zonelor de „întărire” ce apar, în special, la vârful fisurii, dar și datorită altor mecanisme posibile. Ca urmare, după un ciclu de solicitare fisura nu va fi complet închisă. Așa cum este ilustrat în *figura 2.25*, o „creastă” de micro-deformare plastică apare în zonele superioară și inferioară apropiate de vârful fisurii, fiind creată de un ciclu de solicitare. Aceste creste sunt numite „striații”, care pot fi observate pe suprafața de rupere la oboseală cu ajutorul microscopului electronic. Deși aceste imagini au fost deja observate cu mult timp în urmă, cu ajutorul microscopului optic, imagini mult mai bune au fost obținute la microscopul electronic, inițial la microscop electronic cu transmisie (TEM) și mai târziu la Scanning Electron Microscope (SEM). O imagine ilustrativă în acest sens este prezentată în *figura 2.26*. O probă plată din aluminiu a fost încărcată la 10 cicluri de solicitare cu amplitudine mică și un ciclu de solicitare cu amplitudine mai mare. Din *figura 2.26* se constată că există o strictă corespondență între solicitare și amprenta striatiilor rămase în zona fisurii propagate. Este evident că cele 10 cicluri de solicitare cu amplitudine mai mică sunt responsabile pentru striatiile mici în timp ce ciclul de solicitare cu amplitudine mare a condus la apariția adânciturii mai mari, marcată prin zona întunecată din *figura 2.26*. Aceste imagini dovedesc că extinderea fisurii a avut loc în fiecare ciclu al solicitării. O asemenea vizualizare permite determinarea vitezei de propagare a fisurii, dată de mărimea da/dN , (extinderea fisurii în mm pe ciclu de solicitare).

Spațiul dintre 10 striatii este de aproximativ $0,3 \mu\text{m}$ ceea ce ar conduce la o viteză de propagare a fisurii de $0,03 [\mu\text{m}/\text{ciclu}]$.

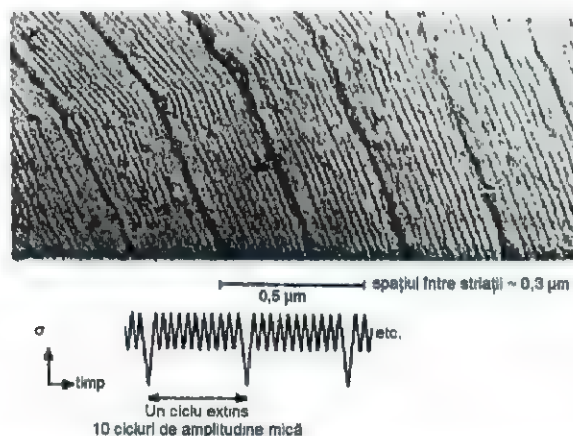


Fig. 2.26. Corespondență între striatii și ciclurile de solicitare în timpul propagării fisurii într-o placă din aluminiu [5]

Apariția striatiilor poate oferi informații importante pentru analiza cedărilor care apar în funcționare. Se poate concluziona că, dacă în imaginea fractografică apar striatii, este de presupus că ruperea s-a produs datorită sarcinii ciclice. Mai mult decât atât, striatiile pot oferi informații cu privire la direcția și viteza de propagare a fisurii. Din păcate, striatiile nu sunt la fel de vizibile pentru toate materialele. Cele mai multe asemenea striatii se pot observa pe aliajele din aluminiu. Cu toate acestea, s-au observat striatii și pe diverse tipuri de oțeluri, aliaje de titan și alte aliaje, deși mai puțin abundente și cu striuri nu foarte bine definite. În cazul în care striurile nu pot fi observate, nu trebuie să se ajungă imediat la concluzia că oboseala nu a avut loc.

Geometria vârful fisurii rotunjite din *figura 2.25* este una destul de simplă. În realitate ar putea fi mult mai complexă. Mecanismul de propagare a fisurii de oboseală la vârful fisurii a fost un subiect de ample analize în literatura de specialitate. În *Figura 2.27* sunt prezentate două modele bine-cunoscute. Ambele modele conduc la crearea unei striatii în fiecare ciclu, numai că geometria vârfului fisurii ca și forma striatiilor rămase după descărcare sunt diferite.

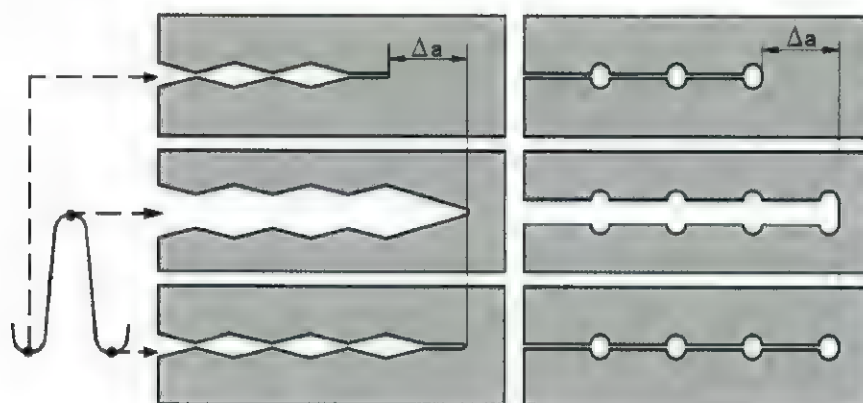


Fig.2.27. Două modele de striatii formate în timpul propagării fisurilor prin oboseală

Primul model dat McMillan și Pelloux [19 din mecanica ruperii] este similar cu cel prezentat în *figura 2.25*. Aceasta presupune faptul că în timpul descărcării vârful fisurii se închide. În modelul prezentat de Laird [20], în spatele vârful fisurii se creează un fel de urechi marcând sfârșitul extinderii fisurii într-un ciclu. Deoarece formarea striatiilor este rezultatul deformăției plastice ciclice, este foarte posibil ca geometria striatiilor să depindă de tipul de material. Modelul propus de McMillan / Pelloux a fost dezvoltat pentru aliaje din aluminiu în timp ce modelul lui Laird se poate aplica pentru metale nealiat.

Studii privind mecanismul de propagare a fisurii sub încărcări ciclice au fost făcute prin analiza fractografică. Cu toate acestea au fost și mai sunt încă anumite dificultăți de interpretare a imaginilor obținute. Observațiile privind propagarea fisurii de oboseală la suprafața materialului nu relevă același tip de comportament ca la interiorul materialului unde fisura posedă un front propriu de propagare. La suprafața liberă, constrângerile la deformare sunt diferite de cele de la interiorul materialului. La interiorul materialului, observații cu privire aspectul striatiilor se pot face numai după deschiderea fisurii de oboseală. Fractografia ne oferă topografia finală nu și situația în timpul procesului dinamic de

extindere și închidere a vârfului fisurii. În plus, dimensiunile privind detaliile striurilor sunt în zone submicronice, caz în care observațiile sunt dificile.

O excepție de la propagarea fisurii după o direcție perpendiculară pe direcția de solicitare se poate observa la unele materiale cum ar fi aliajele din aluminiu sau unele oțeluri. Propagarea fisurii, începând de la suprafață, are loc după plane de alunecare dispuse după o direcție la 45° în raport cu zona centrală a frontului fisurii, *figura 2.28*. Lățimea acestor plane de forfecare crește pe măsură ce fisura avansează până când acoperă întreaga lățime a probei. Inițierea acestui tip de fisurare are loc la suprafața materialului și, ca urmare, este influențată de fenomenele specifice ce apar la suprafață. Posibilitățile de deformare plastică la vârful fisurii, în cazul în care frontul fisurii întâlnește suprafața liberă, sunt mai puțin restrictive decât la mijlocul materialului. Acest lucru permite apariția deformărilor plastice de forfecare, care conduc la apariția marginilor din *figura 2.28*.

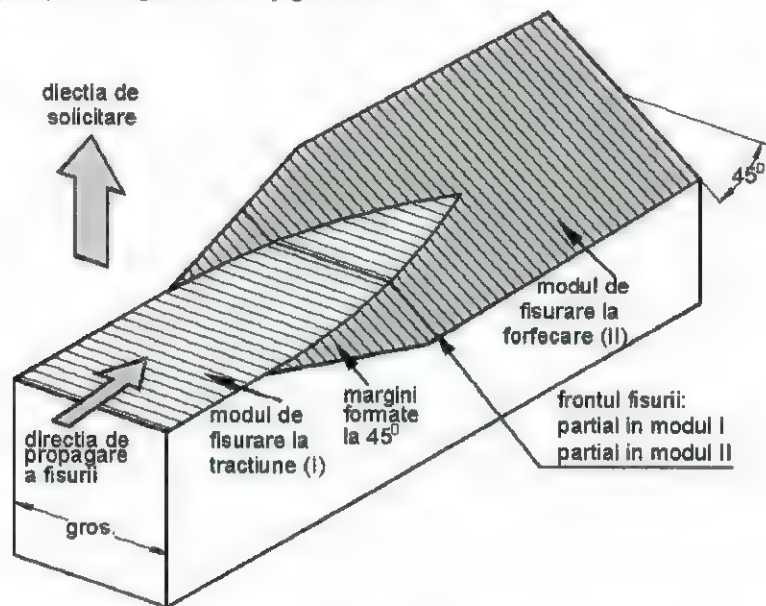


Fig. 2.28. Tranziția propagării fisurii de la modul I la modul II

Aceste margini, ce se formează datorită forfecării, prezintă anumite similitudini cu cele apărute la ruperea prin încercare statică, la fel, în apropierea suprafeței materialului. Predicția direcției de propagare în continuare a unei astfel de fisuri este greu de realizat.

Marginile de forfecare apărute implică faptul că, observațiile microscopice din materialul suprafeței exterioare nu sunt neapărat caracteristice pentru mecanismul de oboseală de la subsuprafața materialului.

2.9. Solicitare ciclică sub acțiunea tensiunilor normale sau tangențiale

Așa cum s-a arătat anterior, alunecarea ciclică reprezintă fenomenul preponderent pentru explicarea nucleației și propagării inițiale a microfisurilor. Se va considera nucleația fisurii într-o probă netedă, fără concentratori de tensiune, pentru două cazuri de încărcare: tracțiune ciclică și torsiune ciclică, *figura 2.29*.

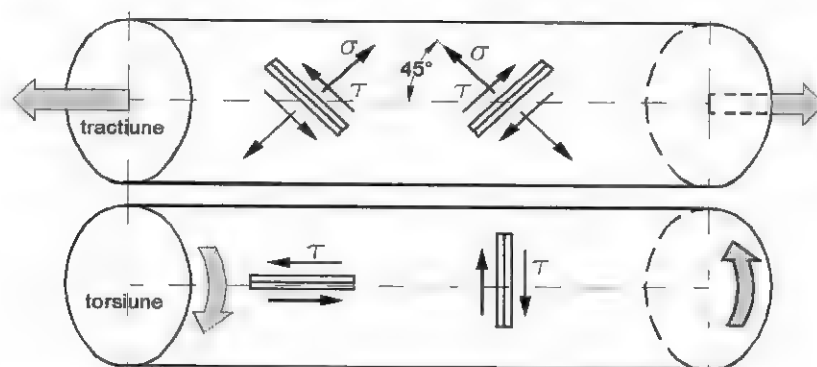


Fig.2.29. Planele de alunecare pe direcția tensiunii tangențiale

Sub solicitarea de tracțiune, tensiunea de forfecare maximă apare după o direcție orientată sub un unghi de 45° față de axa longitudinală. Sub solicitarea de torsiune, planele cu tensiune de forfecare maximă sunt perpendiculare și paralele cu axa longitudinală. O diferență importantă între cele două sisteme de încărcare o reprezintă faptul că, în planul tensiunii de forfecare maximă în cazul tracțiunii, se află și componenta normală a tensiunii ($\sigma = \tau$). În cazul torsiunii ciclice, componentă tensiunii normale este egală cu zero. Atâta timp cât inițierea fisurii se datorează în principal apariției fenomenului de alunecare în grăunții rețelei cristaline, cele două cazuri sunt diferite în esență. În cazul solicitării ciclice de tracțiune tensiunea normală tinde să deschidă microfisura și, în aceste condiții, va crește eficiența tranziției de la alunecare ciclică la propagarea microfisurii de-a lungul benzii de alunecare. În cazul torsiunii ciclice, acest mecanism de deschidere a fisurii este absent. Investigațiile microscopice au arătat că nucleerea fisurii într-o bandă de alunecare aflată sub torsiune ciclică, este problematică în cazul în care amplitudinea sarcinii este relativ scăzută, fiind aproape de limita la oboseală. Pentru amplitudini mai mari ale sarcinii, peste limita de oboseală, sub torsiune ciclică sunt generate microfisuri care se dezvoltă ulterior într-o direcție perpendiculară la tensiunea normală principală.

Bibliografie

- [1] [Jaap Schijve, Fatigue of structures and materials -2010]
- [2] <http://www.maintenancetechnology.com/2012/07/failure-analysis-of-machine-shafts/>
- [3] Incercarea materialelor, vol. 1. Ed. Didactică, București, 1977, D.R. Mocanu, ș.a.
- [4] V Goanta Mecanica ruperii
- [5] R.J.H. Wanhill, , M.F.J. Koolloos, Fatigue and corrosion in aircraft pressure cabin lap splices, International Journal of Fatigue 23 (2001) S337–S347 www.elsevier.com/locate/ijfatigue, National Aerospace Laboratory NLR, P.O. Box 90502, NL-1009 BM Amsterdam, The Netherland
- [6] R. M. Pelloux and J. C. McMillan: *Amer. Soc. Test. Mater., Spec. Tech. Publ.* 415, p. 505, American Society for Testing and Materials, 1966.

CAPITOLUL 3. CARACTERISTICILE MATERIALELOR ÎN TERMENII LIMITEI LA OBOSEALĂ

-
- 3.1. Caracteristicile ciclului periodic cu variație continuă
 - 3.2. Clasificarea ciclurilor de solicitare la oboseală
 - 3.3. Limita la oboseală
 - 3.4. Determinarea limitei la oboseală prin trasarea curbei Wöhler
 - 3.5. Diagramele ciclurilor limită la oboseală
 - 3.6. Efectele factorilor de solicitare
-

În acestui capitol, sunt prezentate caracteristicile materialelor în cazul solicitării la oboseală după un ciclu cu amplitudine constantă. Se va dezvolta conceptul de limită la oboseală și modalități practice de determinare a acesteia. Se vor trece în revistă diagramele utilizate în cadrul conceptului de limită la oboseală.

3.1. Caracteristicile ciclului periodic cu variație continuă

În proiectarea a numeroase piese și structuri, estimarea comportării la solicitări variabile ține seama de datele obținute prin încercarea la oboseală a unor epruvete netede. În acest caz, nu se urmărește prevenirea inițierii sau a propagării necontrolate a fisurilor ci asigurarea față de o stare limită definită prin amplitudinea deformației specifice sau a tensiunii. Solicitățile variabile periodice se pot defini ca o funcție cu variație ciclică în timp. O astfel de variație este definită prin valorile maximă (σ_{max}) și minimă (σ_{min}) pe care tensiunea o atinge în același punct al unei piese solicitate în intervalul de timp de referință. Această variație se poate vedea în figura 3.1 și poate fi descrisă de funcția:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (3.1)$$

în care:

- σ_m este valoarea tensiunii medii a ciclului;
- σ_a este amplitudinea constantă a ciclului;
- f reprezintă frecvența circulară în cicluri pe unitatea de timp;
- φ este unghiul de fază inițial exprimat în radiani.
- Există o interdependență între tensiunile minimă și maximă și tensiunile medii și amplitudinea ciclului descrisă de următoarele relații:

$$\begin{cases} \sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \\ \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a \\ \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \\ \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

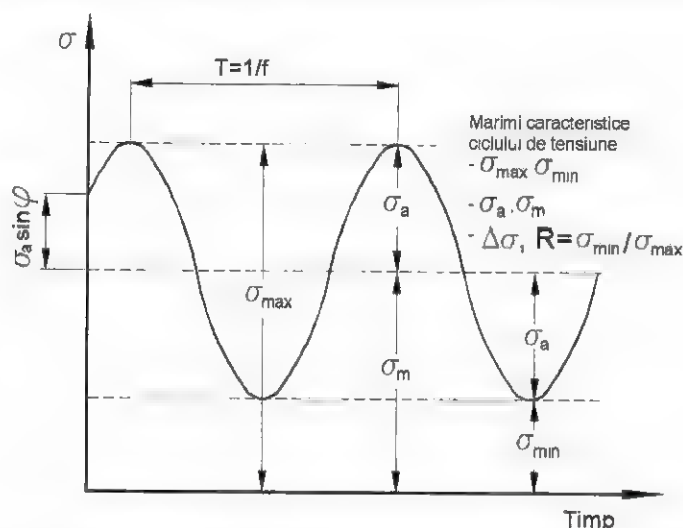


Fig. 3.1. Schematizarea ciclului periodic cu variație continuă

Alte elemente caracteristice ale ciclului de solicitare sunt:

- caracteristica ciclului calculată ca raport între valorile absolute ale amplitudinii și tensiunii medii: $k = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$;
- coeficientul de asimetrie a ciclului calculat ca raport între tensiunea minimă și cea maximă: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$;
- variația tensiunii: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a = \sigma_{max}(1 - R)$;
- perioada T, respectiv frecvența care sunt corelate conform relației: $T = \frac{1}{f}$;

În continuare se prezintă câteva relații de interdependență evidente și care sunt rezultate din cele de mai sus:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 - R); \quad R = \frac{1 - k}{1 + k}; \quad k = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R}{1 + R}$$

3.2. Clasificarea ciclurilor de solicitare la oboseală

În tabelul 3.1 se prezintă o clasificare a ciclurilor periodice în funcție de gradul de asimetrie. În raport cu valoarea coeficientului de asimetrie se disting următoarele tipuri de solicitări:

- 1+9 - Solicitare statică, atunci când tensiunea își menține valoarea constantă:

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} = \sigma_m; \quad \sigma_a = 0;$$

- 2+8 - Solicitare oscilantă, când tensiunea își păstrează semnul:

$$\sigma_{min} / \sigma_{max} > 0;$$

- 3+7 - Solicitare pulsantă atunci când una dintre tensiunile limită este egală cu zero:

$$\sigma_{min} = 0; \quad \sigma_m = \sigma_a = \sigma_{max}/2; \quad R = 0;$$

- 4+6 - Solicitare alternantă atunci când tensiunea își schimbă semnul în timpul solicitării:

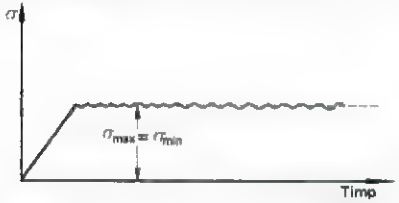
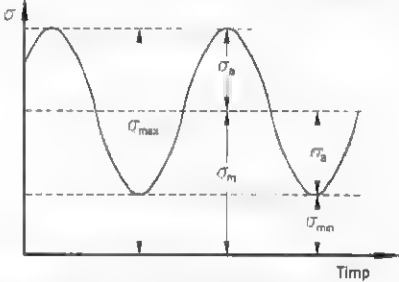
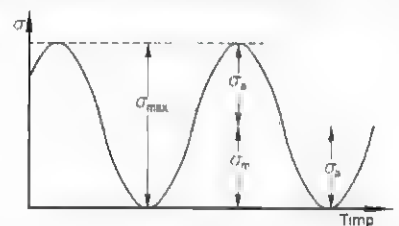
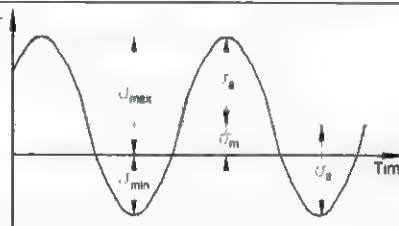
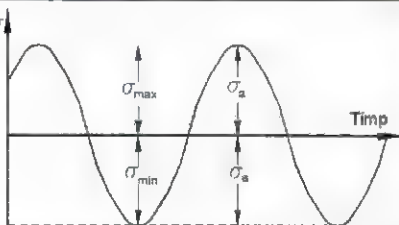
$$\sigma_{\min}/\sigma_{\max}<0;$$

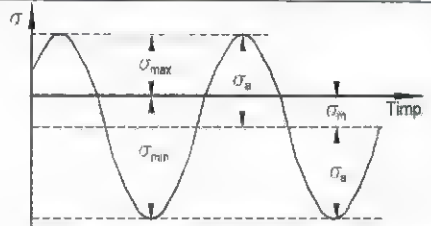
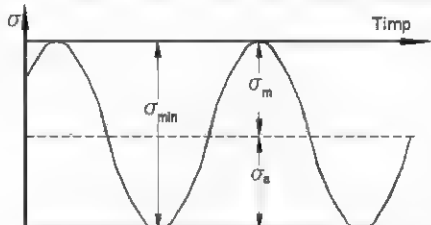
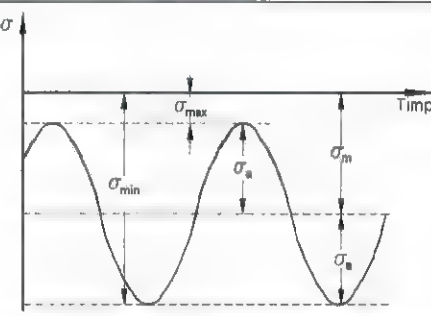
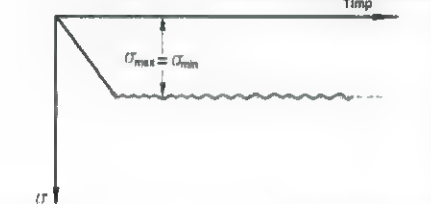
- 5 - Solicitare alternant-simetrică atunci când tensiunile minimă și maximă au aceeași valoare dar sunt de semn contrar:

$$\sigma_{\min}=-\sigma_{\max}; \sigma_m=0; \sigma_a=\sigma_{\max}.$$

Solicitările statică, oscilantă și pulsantă pot fi pozitive sau negative în raport cu σ_m care poate fi pozitivă sau negativă.

Tab. 3.1. Tipuri de cicluri la oboseală

Nr. crt.	Forma ciclului	$\sigma_{\min}; \sigma_{\max}$	$\sigma_m; \sigma_a$	R
1		$\sigma_{\min}=\sigma_{\max}>0$	$\sigma_m=$ $\sigma_{\min}=\sigma_{\max};$ $\sigma_a=0$	$R=+1$
2		$\sigma_{\min}>0; \sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$	$\sigma_m>0; \sigma_a\neq 0$	$0<R<+1$
3		$\sigma_{\min}=0; \sigma_{\max}>0$	$\sigma_m= \sigma_a=$ $\sigma_{\max}/2$	$R=0$
4		$\sigma_{\min}<0; \sigma_{\max}>0$ $\sigma_{\max} > \sigma_{\min} $	$\sigma_m>0; \sigma_a\neq 0$	$-1<R<0$
5		$0>\sigma_{\min}=-\sigma_{\max}$	$\sigma_m=0; \sigma_a=\sigma_{\max}$	$R=-1$

6		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\max} < \sigma_{\min} $	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq 0$	$-\infty < R < -1$
7		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} = 0$	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\min}/2$ $\sigma_m < 0$	$R = -\infty$
8		$\sigma_{\min} < 0; \sigma_{\max} < 0$ $ \sigma_{\max} < \sigma_{\min} $	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq 0$	$+1 > R > -\infty$
9		$\sigma_{\min} = \sigma_{\max} < 0$	$\sigma_m = \sigma_{\min} = \sigma_{\max}$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$

Stările de solicitare cu tensiuni tangențiale variabile sunt caracterizate prin aceleași elemente ca și stările cu tensiuni normale variabile.

3.3. Limita la oboseală

Așa cum s-a constatat din capitolele anterioare, fenomenul de oboseală trebuie analizat și pe baza unor determinări experimentale. În special pentru oțeluri, rezultatele obținute prin încercările la oboseală efectuate pe epruvete pot fi extrapolate la piese, în condițiile în care se ține seama de concentratorii de tensiune, calitatea suprafeței, dimensiune, mediul de lucru, etc. Pentru a putea face aceste extrapolări trebuie să se țină seama de următoarele ipoteze care se referă la materialul din care sunt confecționate epruvetele și piesele:

- Atunci când tensiunea fluctuează de mai multe ori, materialele se pot rupe la tensiuni mai mici decât tensiunea ce se înregistrează la rupere sau chiar mai mici decât tensiunea de curgere;
- Se poate spune că, dacă la o anumită tensiune, un material nu se rupe după un număr suficient de ridicați de cicluri de solicitare, se consideră valoarea acelei tensiuni ca fiind

limită. În aceleași condiții de solicitare, sub această valoare a tensiunii materialul va rezista pe întreaga lui durată de funcționare. Cea mai mare valoare a tensiunii, pentru care materialul nu se rupe după un număr practic nelimitat de cicluri de solicitare poartă numele de **limită la oboseală**.

- Dacă valoarea amplitudinii ciclului de solicitare σ_a se mărește atunci valoarea tensiunii limită descrisă la paragraful anterior va scădea.

Limita la oboseală reprezintă o caracteristică intrinsecă a materialelor, depinzând totuși de felul ciclului de solicitare, iar pentru unele materiale și de frecvența acestuia. Limita la oboseală se notează cu σ_R , în care R reprezintă coeficientul de asimetrie a ciclului de solicitare.

3.4. Determinarea limitei la oboseală prin trasarea curbei Wöhler

Determinarea limitei la oboseală se face pe baza încercărilor de epruvete netede la cicluri de solicitare pe mașini de încercare specializate în acest scop. Schematizarea unei încercări la oboseală care realizează un ciclu de încovoiere alternant-simetric este prezentat în *figura 3.2*. Având în vedere că bara se rotește și că forța de solicitare (greutatea) are tot timpul aceeași direcție, punctul A de pe o secțiune transversală va trece, succesiv, prin stările 1, 2, 3, 4, 1, etc..

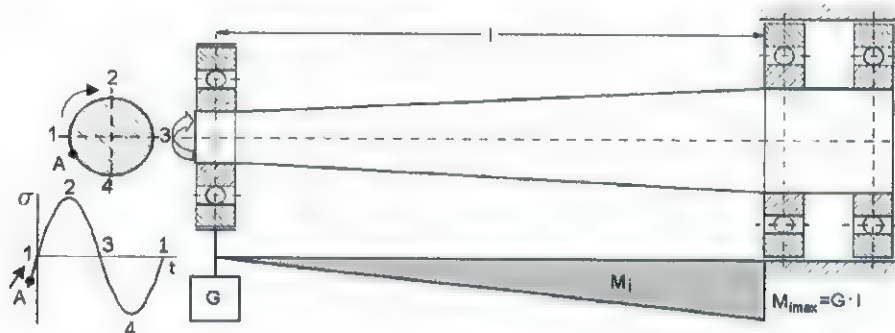


Fig. 3.2. Schema încercării la oboseală prin încovoiere rotativă

Epruvetele pentru încercarea la oboseală trebuie confecționate cu mare grijă. O atenție deosebită trebuie acordată asigurării calității suprafeței. De asemenea, epruveta trebuie confecționată astfel încât să nu existe variații bruște ale secțiunii. Toate epruvetele solicitate, care pot ajunge și la un număr de 50, trebuie executate în aceleași condiții, având strict aceeași formă și dimensiuni și aceeași calitate a suprafeței.

Mașinile de încercat la oboseală trebuie să asigure ciclul de solicitare dorit, fără ca elemente din construcția acestor mașini să se deterioreze ele însele la oboseala indusă. O atenție deosebită trebuie acordată prinderii epruvetelor în dispozitivele mașinii, astfel încât pentru toate probele fixarea în bacuri să permită diferențieri de la probă la probă. Încercările se vor efectua pe aceeași mașină și cu același coeficient de asimetrie R.

Pentru determinarea limitei la oboseală trebuie trasată curba de durabilitate σ -N, în care σ reprezintă, de obicei, valoarea cea mai mare a tensiunii de solicitare iar N reprezintă numărul de cicluri de solicitare - până la rupere în cazul solicitărilor la tensiuni mai mari decât limita la oboseală. Se cunoaște faptul că, prin solicitarea de oboseală în aceleași condiții,

apare o anumită împrăștiere a rezultatelor. Ca urmare, pentru fiecare nivel al tensiunii de solicitare, în funcție și de comportarea materialului, sunt necesare un număr de 5-7 epruvete. În cadrul încercărilor de oboseală efectuate pe epruvete netede se notează valoarea tensiunii maxime și a numărului de cicluri la care a avut loc ruperea epruvetei. Ordinea de încercare este de la tensiuni mari către tensiuni mici, prima treaptă de încercare efectuându-se la $\sigma_{\max}=0,6\sigma_r$. Se continuă încercările până când se ajunge astfel încât cel puțin o epruvetă să nu se mai rupă. Cu perechile de valori $\sigma_{\max,i}-N_i$ se poate trasa o curbă ca cea din *figura 3.3* denumită și curba Wöhler.

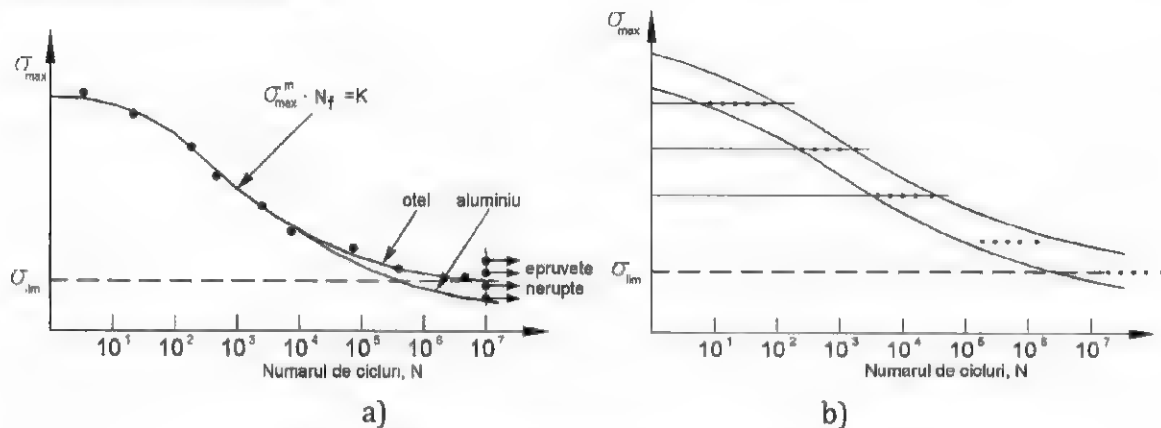


Fig. 3.3. Curba de oboseală sau curba Wöhler

Curba din *figura 3.3.a* este trasată pentru cazul în care dispersia rezultatelor obținute în urma încercărilor experimentale este mică. Din determinările experimentale s-a constatat faptul că, cel puțin în zona tensiunilor mari, dispersia rezultatelor obținute este mai mare, acestea având valori mult diferite chiar în cazul repetării experimentului strict în aceleași condiții. În cazurile în care dispersia rezultatelor încercărilor la oboseală este mare, trebuie ca la aceeași tensiune de solicitare să se încerce mai multe epruvete. În acest caz rezultatele încercării la oboseală au reprezentarea sub formă de bandă, ca în *figura 3.3b*. Pentru un număr suficient de mare de încercări, curba din *figura 3.3a* tinde asimptotic spre o anumită valoare a tensiunilor maxime, presupunându-se că mai jos de această valoare epruveta netedă nu se va mai rupe oricât de mult ar fi solicitată.

Valoarea tensiunii maxime, σ_{\max} , pentru care presupunem că nu se mai produce ruperea epruvetei, supusă la un număr oricât de mare de cicluri de solicitare, poartă numele de **limită teoretică la oboseală**. Se presupune că, dacă până la N_0 cicluri de solicitare epruvetele nu se rup, atunci ele nu se vor rupe oricâte cicluri de solicitare i-am aplica. În practică, pentru un anumit grad de asimetrie a ciclului R, **limita la oboseală** se definește ca fiind valoarea tensiunii maxime la care se ajunge după un număr N_0 de cicluri de solicitare, în condițiile în care epruveta nu s-a rupt. În mod obișnuit, în funcție de material, epruvetele se supun la un anumit număr limită de cicluri de solicitare. Numărul de cicluri de solicitare pentru care epruvetele nu se mai rup, pentru diferite materiale sunt:

- $N_0=2 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^7$ pentru oțeluri;
- $N_0=2 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$ pentru aliaje ușoare;
- $N_0=2 \cdot 10^6$ pentru lemn;

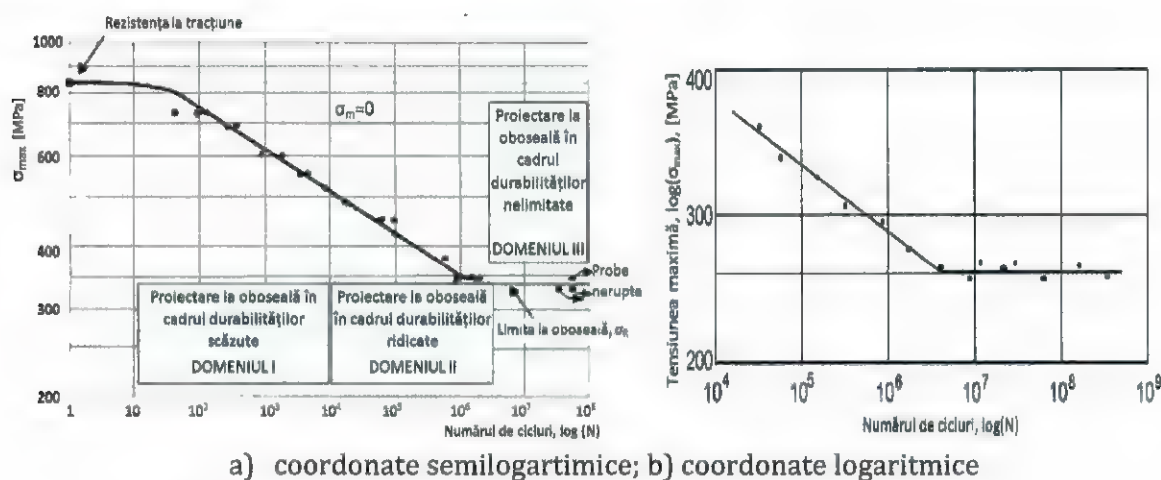
- $N_0 = 2 \cdot 10^6 \dots 3 \cdot 10^6$ pentru beton.

Limita la oboseală se notează cu σ_R , în care R reprezintă valoarea coeficientului de asimetrie, care trebuie să fie constantă pe parcursul tuturor determinărilor. Pentru solicitarea axială se adaugă la indice și litera „t” pentru tracțiune, respectiv „c” pentru compresiune. Exemple de notații:

- $\sigma_{0,7t}$ – limita la oboseală după un ciclu oscilant, cu proba supusă la tracțiune;
- τ_0 – limita la oboseală după un ciclu pulsant, cu proba supusă la răsucire;
- σ_{-1} – limita la oboseală după un ciclu alternant simetric, cu proba supusă la încovoiere.

Curbele de oboseală se pot trasa și în coordonate σ_a -N, respectiv amplitudinea ciclului de solicitare în raport cu numărul de cicluri până la rupere.

Alte reprezentări ale curbei Wöhler se regăsesc în coordonate semilogaritmice, *figura 3.4a* sau logaritmice, *figura 3.4b*.



a) coordonate semilogaritmice; b) coordonate logaritmice
Fig. 3.4. Rezultatele încercării la oboseală pe epruvete netede

Curba în coordonate semilogaritmice ($\log N$) din *figura 3.4a* prezintă particularitatea definirii a trei domenii:

- domeniul I al solicitărilor la tensiuni mari și cu un număr mic de cicluri: $N < 10^4$;
- domeniul II al solicitărilor în cadrul durabilităților limitate pentru care $10^4 < N < 2 \cdot 10^6$ (pentru oțel);
- domeniul III al solicitărilor în cadrul durabilităților nelimitate pentru care $N > 2 \cdot 10^6$ (pentru oțel);

Reprezentarea curbei Wöhler în coordonate logaritmice ($\log \sigma_{max}$ - $\log N$) se prezintă sub forma a două drepte a căror intersecție se produce la valoarea limitei de oboseală pentru tensiunea maximă.

Oricare ar fi modul de reprezentare a curbelor de durabilitate la oboseală, diferitele domenii ale acestora pot fi descrise de anumite ecuații. Câteva dintre aceste sunt prezentate în cele ce urmează.

O ecuație care cuprinde atât domeniul II cât și domeniul III este cea dată de Weibull, respectiv:

$$(3.3)$$

în care m și q reprezintă constante de material.

Din relația 3.3 se constată că, atunci când $\sigma_{\max} = \sigma_{-1}$ va rezulta $N \rightarrow \infty$ ceea ce reprezintă și definiția limitei teoretice la oboseală.

În ultima vreme se proiectează multe dintre organele de mașini să funcționeze în cadrul domeniului II, al durabilității limitate. O relație care descrie foarte bine această zonă are forma:

$$\sigma_{\max} = a \cdot N^b \quad (3.4)$$

în care a și b reprezintă constante de material.

În cazul în care, reprezentarea curbei de durabilitate se face în coordonate $\log \sigma_a - \log N$, avem o relație asemănătoare, respectiv:

$$\sigma_a \cdot N = \text{const.} \quad (3.5)$$

ce reprezintă relația lui Basquin.

Atunci când reprezentarea curbei de durabilitate se face în coordonate semilogartmice ($\sigma_{\max} - \log N$), relația care descrie această curbă este de forma:

$$\sigma_{\max} = c + d \cdot \log N \quad (3.6)$$

în care c și d reprezintă constante de material.

Din încercările experimentale a reieșit faptul că limita la oboseală în cazul solicitării axiale este mai mică decât limita la oboseală determinată la solicitarea de încovoiere. Între acestea, pentru majoritatea cazurilor, se poate scrie următoarea relație:

$$\sigma_{-1t} = (0,7 \dots 0,8) \sigma_{-1} \quad (3.7)$$

Această diferențiere în comportarea la solicitarea axială față de încovoiere se poate explica astfel: la solicitarea axială avem o stare omogenă de tensiuni, în oricare secțiune a probei o aceeași valoare (maximă) a tensiunii, și, ca urmare, un mai mare volum de material este supus la tensiunile maxime, spre deosebire de solicitarea de încovoiere la care tensiunea maximă se regăsește doar la nivelul suprafeței. Se poate presupune că, dacă există defecte sau imperfecțiuni ale rețelei cristaline în interiorul piesei, de la care să se dezvolte în continuare o microfisură prin oboseală, acele defecte sau imperfecțiuni vor fi solicate la tensiuni mult mai mari în cazul solicitării axiale decât în cazul solicitării de încovoiere, pentru aceeași tensiune maximă de solicitare.

Există și relații empirice care stabilesc o corelație între limita de curgere și rezistența la rupere prin tracțiune (σ_u sau R_m). Aceste relații trebuie utilizate cu o anumită precauție, având în vedere faptul că anumite clase de materiale au comportamente diferite la oboseală. De exemplu, pentru oțelurile cu rezistența la rupere prin tracțiune cuprinsă între 1200 MPa și 1800 MPa, se poate utiliza relația:

$$\sigma_{-1} \approx 400 + \frac{1}{6} \sigma_u \text{ [MPa]} \quad (3.8)$$

Pentru metale neferoase se prezintă un interval de variație:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \div 0,50)\sigma_u$$

Alte relații ce se pot utiliza sunt:

- $\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_u$ pentru oțel solicitat la încovoiere;
- $\sigma_0 \approx (1,5 \dots 1,6) \sigma_{-1}$ pentru oțel solicitat la ciclu pulsant;
- $\tau_{-1} \approx 0,6 \sigma_{-1}$ pentru oțel solicitat la torsiune;
- $\tau_0 \approx (1,8 - 2) \tau_{-1}$ pentru oțel solicitat la torsiune, ciclu pulsant.

În *tabelul 3.2* se prezintă valorile rezistenței la oboseală pentru câteva mărci de oțel [Tripa]

Tab. 3.2. Valori ale rezistenței la oboseală pentru câteva mărci de oțel

Oțel cu σ_u [MPa]	Tracțiune-compresiune σ_{-1t} [MPa]	Încovoiere σ_{-1} [MPa]	Torsiune τ_{-1} [MPa]
320-420	120-150	160-220	80-120
400-500	120-160	170-220	100-130
480-600	170-210	200-270	110-140
600-750	190-250	250-340	150-200
700-850		310-380	170-230
850-1050		400-450	210-250
1050-1250		450-490	250-300
1250-1450		500-600	280-350

În *figura 3.4a* asimptota orizontală inferioară reprezintă limita la oboseală. Pe lângă aceasta, mai apare și o asimptotă orizontală la partea superioară a curbei de durabilitate. În cazul în care $\sigma_m = \sigma_u$, unde σ_u reprezintă rezistența (ultimă) la tracțiune a materialului (fiind notată și cu R_m), epruveta va ceda în primul ciclu de încercare. În acest caz vom avea $\sigma_a = 0$, respectiv $\sigma_m = \sigma_u$ sau $\sigma_m > 0$ dacă $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_u$. În orice caz, dacă σ_a are o valoare puțin mai mică decât σ_u , proba nu va ceda în primul ciclu de solicitare. De obicei, proba poate rezista și la un număr de 100 de cicluri de solicitare și chiar mai mult ca rezultat al ecruisării sau întăririi prin deformare plastică, *figura 3.5*.

În primul ciclu de la 0 la A, apare o deformare plastică semnificativă datorită faptului că tensiunea maximă din epruvetă depășește limita de curgere a materialului. Următoarele două subsecvențe, respectiv, descărcarea până în punctul B și încărcarea până în punctul A, conduc la o amplitudine a deformăției plastice mult mai mică datorită tenacității la deformare a materialului, ceea ce se poate observa și din bucla de histerezis din *figura 3.5*. Bucla de histerezis poate susține un număr substanțial de cicluri de solicitare înainte ca epruveta să se rupă. În consecință, în cadrul curbei de durabilitate apare respectiva asimptotă orizontală superioară.

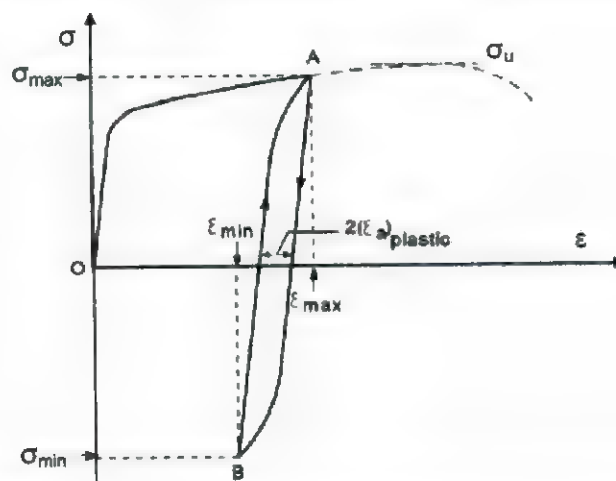


Fig. 3.5. Bucla tensiune-deformație în cadrul ciclului de solicitare cu amplitudine ridicată peste limita de curgere a materialului

Oboseala la amplitudini ridicate presupune solicitarea la un număr relativ redus de cicluri, de obicei până în 10^4 cicluri, și face parte din domeniul I, *figura 3.4a*. Granița dintre domeniul I și domeniul II nu este foarte bine definită. O diferențiere mai bună o constituie faptul că oboseala efectuată la nivele mari ale tensiunii este asociată cu deformații plastice pentru fiecare ciclu de solicitare pe când oboseala condusă la nivele mici ale tensiunii produce deformații elastice în volumul întregii epruvete. Este evident faptul că atenția este îndreptată în special spre domeniul II al curbei de durabilitate, pentru funcționarea la un număr mare de cicluri de solicitare. Nu toate materialele prezintă o limită de oboseală determinată în mod foarte clar. Multe materiale neferoase cum ar fi: aliajele din aluminiu, magneziu, cupru, etc. prezintă o curbă de durabilitate la oboseală cu variație descendentă, *figura 3.6*.

Pentru astfel de aliaje nu se mai poate defini o limită la oboseală ci o rezistență la oboseală convențională, $\sigma_{R,N}$, ca fiind valoarea tensiunii maxime corespunzătoare unei anumite durabilități N , pentru un ciclu cu gradul de asimetrie R . Limita la oboseală reprezintă rezistența la oboseală σ_{R,N_0} , pentru materialele ce prezintă asimptotă orizontală inferioară la curba de durabilitate. Din acest motiv se vorbește în general despre rezistență la oboseală ce cuprinde și termenul de limită la oboseală pentru un număr de cicluri dincolo de N_0 .

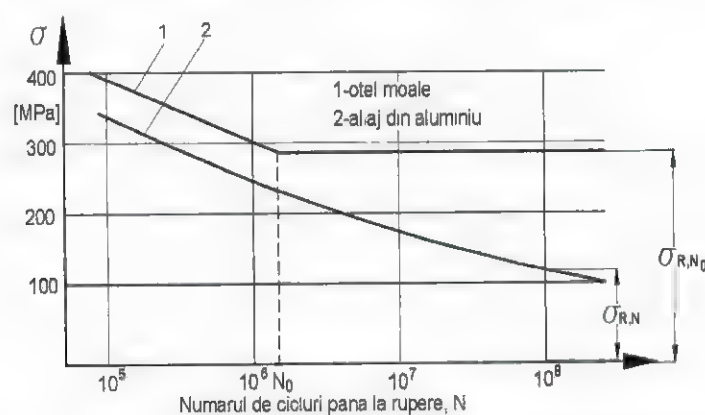


Fig. 3.6. Curbe de oboseală pentru un oțel moale și un aliaj din aluminiu

3.5. Diagramele ciclurilor limită la oboseală

Dacă se conduce o solicitare la oboseală pentru un material, utilizându-se diferiți coeficienți de asimetrie, pentru limita la oboseală vor rezulta valori diferite, *figura 3.7a*. Un ciclu având $\sigma_m=0$ este un ciclu alternant simetric. Pentru ca o epruvetă la care σ_m crește, să se rupă la *aceeași valoare a numărului de cicluri* ($N=10^4$ sau $N=10^7$ de exemplu) trebuie ca amplitudinea ciclului, σ_a , să scadă. Dacă nu s-ar întâmpla acest lucru, tensiunea maximă ar crește și epruveta s-ar rupe după un număr mai mic de cicluri. Aceasta este explicația curbelor trasate în *figura 3.7a*. Evident că, fiecare dintre aceste curbe are coeficient de asimetrie diferit. Reprezentarea grafică a variației limitei la oboseală în raport cu coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare poartă numele de **diagramă a ciclurilor limită**. În *figura 3.7b*, diagrama ciclurilor limită este cea trasată pentru $N=N_0$ (în acest caz 10^7 cicluri). Prin ciclu limită definim un ciclu **cu un anumit grad de asimetrie** a cărui tensiune maximă este egală cu limita la oboseală corespunzătoare gradului de asimetrie respectiv. Pentru fiecare punct de pe diagrama ciclurilor limită avem un alt coeficient de asimetrie.

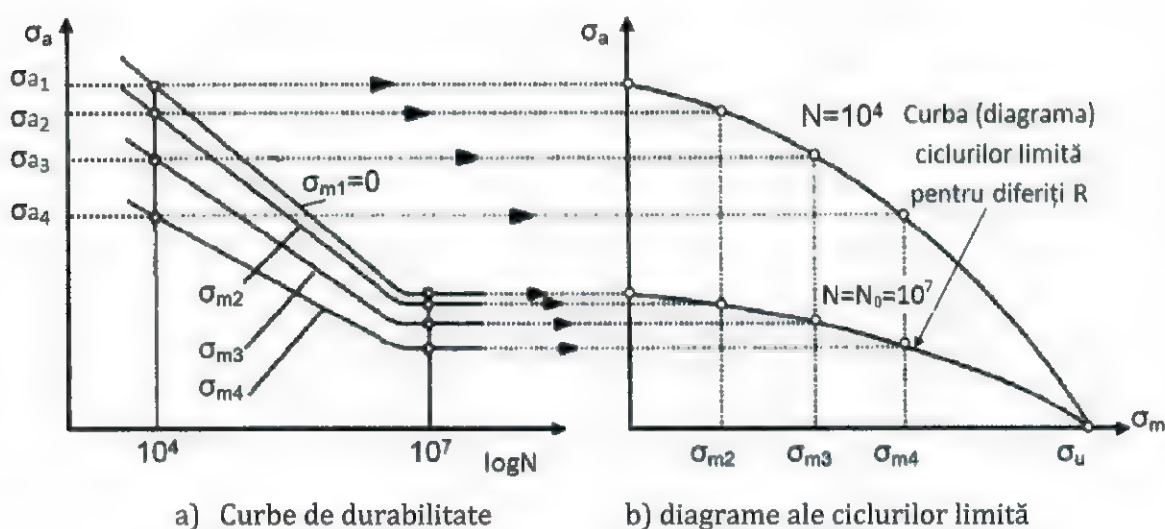


Fig. 3.7. Curbe de durabilitate pentru diferiți coeficienți de asimetrie

Din *figura 3.7* se poate constata că limita la oboseală crește pe măsură ce tensiunea medie crește, ca urmare pe măsură ce gradul de asimetrie tinde către valori pozitive. De aici se poate vedea influența coeficientului de asimetrie asupra rezultatelor la încercările de oboseală. Din punct de vedere experimental este destul de dificil de a trasa curbele de durabilitate ale unui material pentru diferiți coeficienți de asimetrie a ciclului de solicitare. În aceste condiții, s-a impus trasarea unor diagrame simplificate cu ajutorul cărora să se poată determina limita la oboseală pentru diferiți coeficienți de asimetrie, chiar dacă nu s-a trasat o curbă de durabilitate pentru acei coeficienți.

Se cunosc mai multe tipuri de diagrame după mărimile trecute în axele de coordonate.

3.5.1. Diagrama ciclurilor limită de tip Haigh

Această diagramă este o reprezentare în coordonate σ_a - σ_m , respectiv amplitudinea ciclului de solicitare în raport cu tensiunea medie, iar un ciclu de solicitare se reprezintă printr-un punct. *Figura 3.8* prezintă o diagramă de tip Haigh pentru **solicitări cu $\sigma_m > 0$** .

Curba ABU reprezintă curba ciclurilor limită, valorile tensiunilor de pe această curbă conținând indicele „L”. Toate punctele care se regăsesc în exteriorul curbei ciclurilor limită reprezintă tot atâtea posibilități ca epruvetele să se rupă, solicitate fiind cu un număr de cicluri mai mare ca N_0 . Suma coordonatelor unui punct L aflat pe curba ciclurilor limită reprezintă chiar limita la oboseală. Ca urmare vom avea:

$$\sigma_{max_{l_i}} = \overline{OQ} + \overline{QL} = \sigma_{m_{l_i}} + \sigma_{a_{l_i}} \quad (3.9)$$

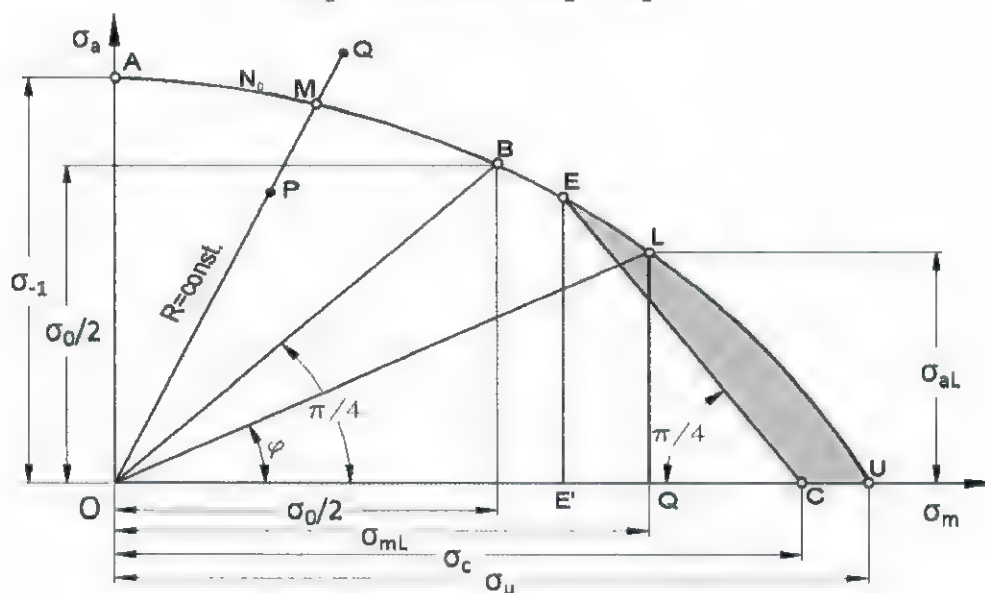


Fig. 3.8. Diagrama Haigh pentru solicitări de tracțiune

In acest caz, coeficientul de asimetrie va avea valoarea:

$$R = \frac{\sigma_{minL}}{\sigma_{maxL}} = \frac{\sigma_{mL} - \sigma_{aL}}{\sigma_{mL} + \sigma_{aL}} \quad (3.10)$$

Dacă se cunoaște valoarea coeficientului de asimetrie R , punctul L se poate găsi calculând panta dreptei OL cu relația:

$$tg\varphi = \frac{\sigma_{a_L}}{\sigma_{m_L}} = \frac{\sigma_{max_L} - \sigma_{min_L}}{\sigma_{max_L} + \sigma_{min_L}} = \frac{1-R}{1+R} \quad (3.11)$$

Pe curba ciclurilor limită din *figura 3.8* se pot determina trei puncte particulare, respectiv:

- Punctul A ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu alternant simetric;
- Punctul B ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant;
- Punctul U care determinat pe baza unei încercări statice de tracțiune, în care σ_u reprezintă rezistența la tracțiune (ultimă), a materialului, notată și cu R_m .

Pentru materialele ductile la care tensiunea de curgere σ_c este tensiune limită, porțiunea EUCE din diagramă nu se mai ia în considerare. Dreapta CE reprezintă, în acest caz, curba limită pentru care $\sigma_{max} = \sigma_c$. De exemplu, pentru punctul E avem:

$$\sigma_{max_L} = \overline{OE'} + \overline{EE'} = \overline{OE'} + \overline{E'C} = \sigma_c \quad (3.12)$$

întrucât $\overline{EE'} = \overline{E'C}$ (unghiul C este 45°).

În continuare se va examina o diagrama de tip Haigh completă, pentru care se consideră atât solicitările de tracțiune cât și solicitările de compresiune, figura 3.9.

În cadrul acestei diagrame se consideră că pot fi determinate și, ca urmare, cunoscute, următoarele mărimi:

- Limita de curgere la tracțiune, σ_{ct} ;
- Limita de curgere la compresiune, σ_{cc} ;
- Rezistența la rupere prin tracțiune, σ_{ut} ;
- Rezistența la rupere prin compresiune, σ_{uc} ; cu $\sigma_{ct} < \sigma_{cc}$ și $\sigma_{ut} < \sigma_{uc}$.

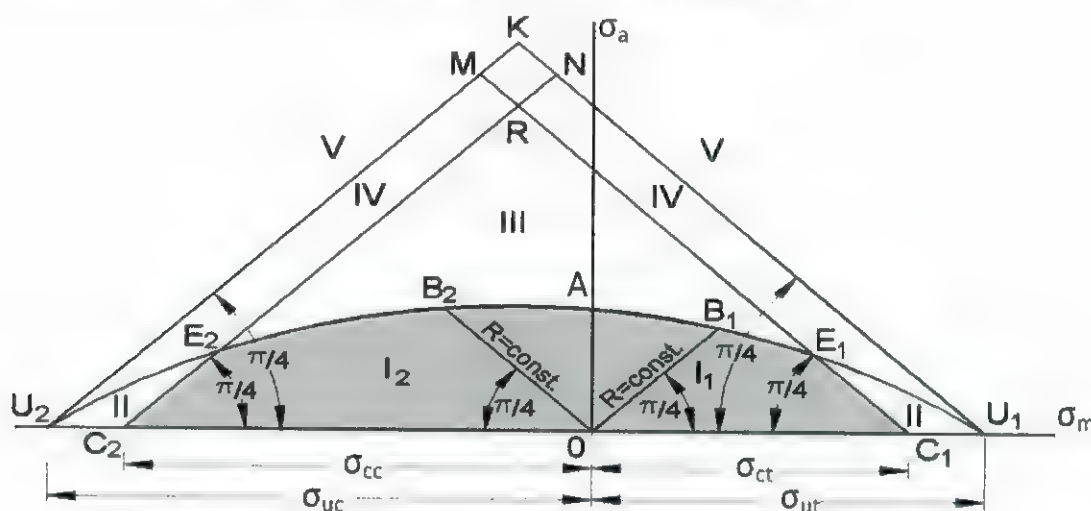


Fig. 3.9. Diagrama Haigh completă

Construcția diagramei se face pornind de la stabilirea punctelor U_1 , C_1 , U_2 și C_2 , corespunzătoare valorilor pentru mărimile σ_{ut} , σ_{ct} , σ_{uc} și σ_{cc} . Conform figurii 3.8, din aceste puncte se trasează drepte la 45° , care se vor intersecta în punctele K și R. Se constată că, oricare ar fi un punct de pe dreptele U_1K și U_2K , tensiunea maximă corespunzătoare acestora este dată de relația:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a = \sigma_{ut} \quad (3.13)$$

Ca urmare, pentru realizarea acestor puncte este necesar să efectueze un singur ciclu de solicitare după care epruveta se va rupe. Tensiunea care se atinge în punctele de pe dreptele C_1R și C_2R este cea corespunzătoare limitei de curgere. Dacă, după un anumit număr de cicluri de funcționare se ajunge la dreptele C_1R și C_2R , dincolo de acestea solicitarea va avea loc cu deformații plastice semnificative, chiar de la următorul ciclu de solicitare. În zona mărginită de punctele U_1C_1RN , deformațiile plastice se vor realiza sub acțiunea solicitării de tracțiune, în zona mărginită de punctele U_2C_2RM deformațiile plastice vor apărea sub acțiunea solicitării de

compresiune în timp ce în zona RNKM deformațiile plastice apar și la întindere și la compresiune.

Se trasează apoi diagrama ciclurilor limită care trebuie să treacă printr-o serie de puncte obligatorii:

- Punctul U_1 corespunzător rezistenței de rupere la solicitarea de tracțiune, σ_{ut} sau σ_{+1t} ;
- Punctul B_1 ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant de tracțiune, σ_{0t} ;
- Punctul A ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu alternant simetric, σ_{-1} ;
- Punctul B_2 ce reprezintă limita la oboseală determinată după un ciclu pulsant de compresiune, σ_{0c} ;
- Punctul U_2 corespunzător rezistenței de rupere la solicitarea de compresiune, σ_{+1c} .

Coeficientul de asimetrie R este constant pentru oricare dreaptă dusă din punctul O pe curba ciclurilor limită. Pentru determinarea coeficientului de asimetrie pentru un punct oarecare de pe curba ciclurilor limită se va utiliza *relația 3.10*, corespunzătoare aceluși punct. Cele patru drepte trasate la 45° , precum și curba ciclurilor limită împart diagrama Haigh în cinci zone:

- I- (I_1+I_2) Zona tensiunilor în care solicitarea prin oboseală produce doar deformații elastice. Această zonă este cea în care funcționează majoritatea organelor de mașini;
- II- În interiorul acestei zone se produc deformații plastice încă de la următorul ciclu de solicitare de la depășirea zonei I. Dacă nivelul tensiunilor este astfel încât din această zonă ne apropiem de curba ciclurilor limită, ruperea va deveni inevitabilă;
- III- Înainte de a ajunge în această zonă, solicitarea a produs, în cea mai mare parte, doar deformații elastice. În această zonă se produce ruperea după un număr relativ mare de cicluri de solicitare. Deformații plastice dacă apar, sunt limitate în zona din imediata vecinătate a fisurii care se propagă catastrofal până la rupere;
- IV- În această zonă apar deformații plastice semnificative, ruperea producându-se datorită propagării unei fisuri pornind de la o microfisură dezvoltată ca urmare a blocării pe un obstacol a dislocațiilor provocate de deformația plastică respectivă;
- V- Este zona ciclurilor care nu se pot realiza în mod practic, fiind dincolo de rezistența la rupere a materialului.

Zona care a fost studiată cel mai mult și care prezintă interesul cel mai mare este zona I_1 , respectiv zona în care tensiunile medii sunt pozitive. Acest lucru se datorează și faptului că, majoritatea materialelor se comportă mai slab la tracțiune decât la compresiune. Ca urmare, odată stabilită valoarea limitei la oboseală pentru tracțiune aceasta este acoperitoare din punct de vedere al proiectării la oboseală, și pentru zona de compresiune.

3.5.2. Schematizări ale diagramei Haigh

Chiar și pentru zona I_1 diagrama Haigh este destul de dificil de trasat, având în vedere numărul mare de determinări experimentale ce trebuie efectuate asupra aceluiași material. În aceste condiții, s-au propus o serie de schematizări ale diagramei Haigh, astfel încât acestea să

fie acoperitoare din punct de vedere al proiectării la oboseală și să utilizeze cât mai puține și elocvente determinări experimentale. În *figura 3.10* sunt prezentate câteva dintre schematizările acestei diagrame, care pot fi trasate fără prea mare dificultate.

Așa cum rezultă din *figura 3.10*, schematizările utilizate țin seama de comportarea materialului la solicitarea de oboseală. Observația care trebuie făcută aici este aceea că, cele patru valori ale tensiunilor indicate în *figura 3.10*, respectiv, σ_u , σ_c , σ_0 și σ_{-1} , diferă de la un material la altul și că, pentru diferite materiale (fragile, ductile, etc.) dreptele de schematizare ar avea atât punctele de pe abscisă, punctele de pe ordonată cât și pantele, diferite.

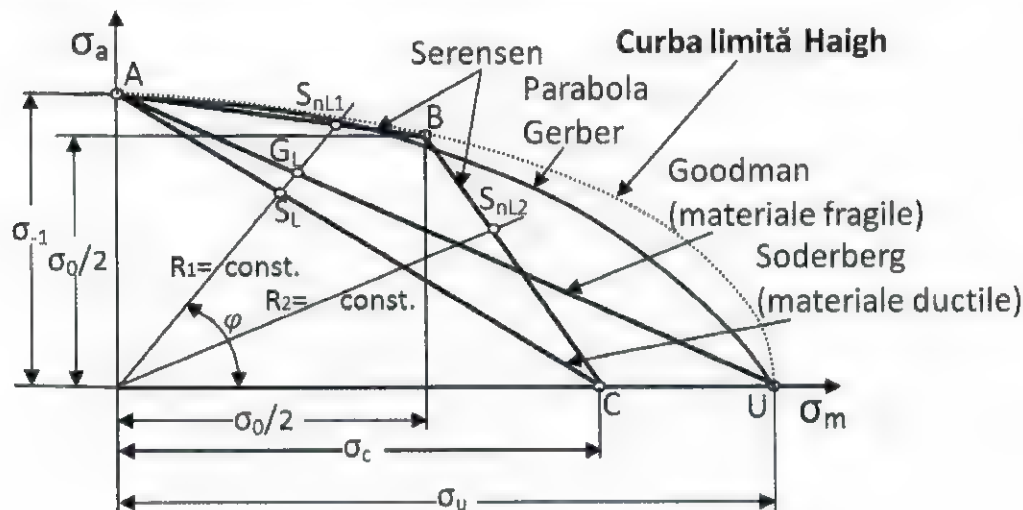


Fig. 3.10. Schematizări ale diagramei Haigh

Pentru materialele fragile (ceramice, fontă, oțeluri tratate termic) la care ruperea se produce relativ repede după zona de elasticitate, se poate utiliza **schematizarea Goodman**, *figura 3.11*, pentru care dreapta limită are ecuația:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.14)$$

Ecuția acestei drepte se intersectează cu ecuația dreptei pentru coeficientul de asimetrie, respectiv:

$$R = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (3.15)$$

și se vor obține coordonatele $(\sigma_{aGL}, \sigma_{mGL})$ ale punctului de intersecție G_L , care, conform *relației (3.9)*, vor da tensiunea maximă limită, înregistrată pentru ciclurile de solicitare având coeficientul de asimetrie R :

$$\sigma_{mGL} = \frac{\sigma_u \sigma_{-1}}{\sigma_u \frac{(1-R)}{(1+R)} + \sigma_{-1}} = \frac{\sigma_u \sigma_{-1}}{\sigma_u \operatorname{tg} \varphi + \sigma_{-1}} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{aGL} = \frac{\sigma_u \sigma_{-1}}{\sigma_u + \sigma_{-1} \frac{(1+R)}{(1-R)}} = \frac{\sigma_u \sigma_{-1}}{\sigma_u + \sigma_{-1} \operatorname{ctg} \varphi} \quad (3.17)$$

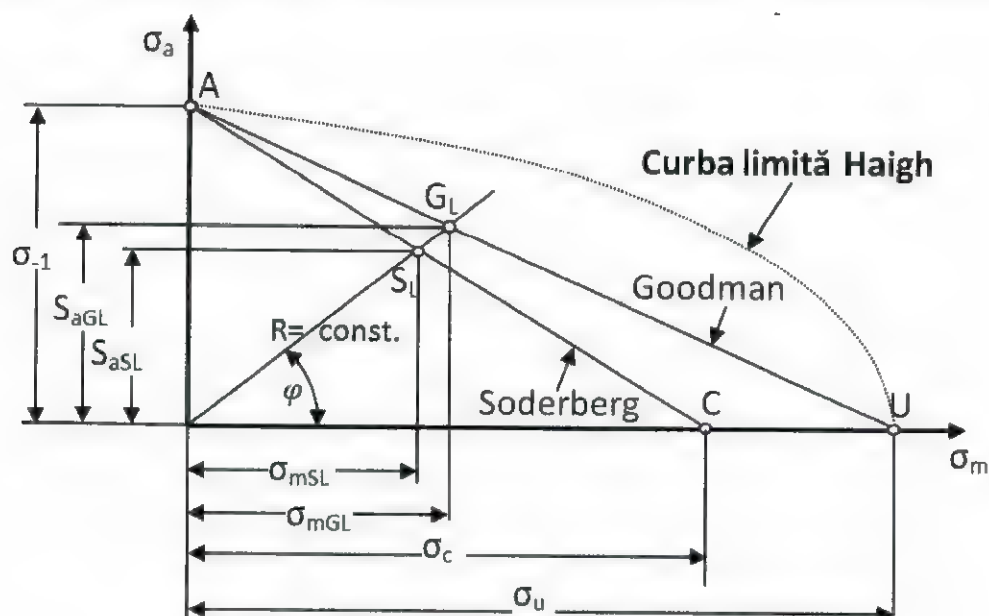


Fig. 3.11. Schematizările Goodman și Soderberg

Pentru materialele care suferă deformații plastice însemnate înainte de rupere, starea limită fiind dată de limita de curgere, se poate utiliza **schematizarea Soderberg** a cărei dreaptă are ecuația:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c} = 1 \quad (3.18)$$

Intersectându-se ecuația acestei drepte cu ecuația dată de *relația (3.15)* se vor obține coordonatele $(\sigma_{aSL}, \sigma_{mSL})$ ale punctului de intersecție S_L , care, conform *relației (3.9)*, vor da tensiunea maximă limită, înregistrată pentru ciclurile de solicitare având coeficientul de asimetrie R :

$$\sigma_{mGL} = \frac{\sigma_c \sigma_{-1}}{\sigma_c \frac{(1-R)}{(1+R)} + \sigma_{-1}} = \frac{\sigma_c \sigma_{-1}}{\sigma_c t g \varphi + \sigma_{-1}} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{aGL} = \frac{\sigma_c \sigma_{-1}}{\sigma_c + \sigma_{-1} \frac{(1+R)}{(1-R)}} = \frac{\sigma_c \sigma_{-1}}{\sigma_c + \sigma_{-1} \operatorname{ctg} \varphi} \quad (3.20)$$

Schematizarea Serensen este prezentată în detaliu în *figura 3.12*.

Trasarea acestei diagrame are loc astfel:

- Se consideră punctul A determinat de valoarea σ_1 pe ordonată (σ_a) și punctul C determinat de valoarea σ_c pe abscisă (σ_m);
- Se figurează punctul B de coordonate ($\sigma_0/2, \sigma_0/2$) construindu-se **dreapta AB**;
- Se construiește dreapta BC;
- Din punctul C se trasează o dreaptă la 45° (ca în *figura 3.12*) ce intersectează dreapta BC în G;
- Ca urmare a construcției de la punctul anterior se obțin **dreptele BG și GC**.

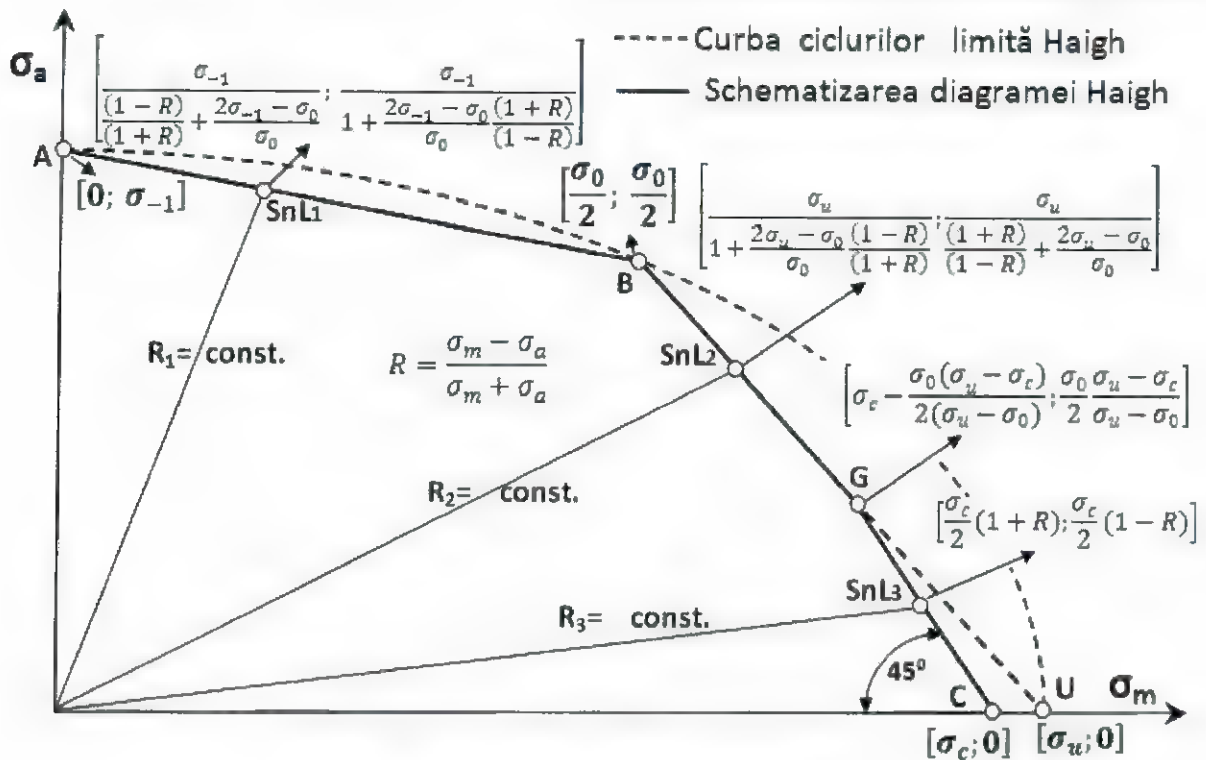


Fig. 3.12. Schematizarea Serensen

Schematizarea Serensen este compusă din dreptele AB, BG (BU) și GC ale căror ecuații sunt date de:

- dreapta AB:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\frac{\sigma_0 \sigma_{-1}}{2\sigma_{-1} - \sigma_0}} = 1 \quad (3.21)$$

- dreapta BG (BU):
$$\frac{\frac{\sigma_a}{\frac{\sigma_0 \sigma_u}{2\sigma_u - \sigma_0}}}{\frac{\sigma_0 \sigma_u}{2\sigma_u - \sigma_0}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.22)$$

- dreapta GC:
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \frac{\sigma_m}{\sigma_c} = 1 \quad (3.23)$$

Dacă se intersectează ecuațiile dreptelor BG și GC, se obțin coordonatele punctul G, ca fiind:

$$\sigma_m = \sigma_c - \frac{\sigma_0(\sigma_u - \sigma_c)}{2(\sigma_u - \sigma_0)}; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_0 \sigma_u - \sigma_c}{2 \sigma_u - \sigma_0}$$

Intersectându-se ecuația dreptelor AB, BG și GC cu ecuația dată de *relația (3.15)* se vor obține coordonatele $(\sigma_{aL}, \sigma_{mL})$ ale punctelor de intersecție Sn1 , Sn2 și Sn3 , care, conform *relației (3.9)*, vor da tensiunea maximă limită, înregistrată pentru ciclurile de solicitare având coeficientul de asimetrie R:

- punctul de intersecție cu dreapta AB:

$$\sigma_{m\text{Sn1L}} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{(1-R)}{(1+R)} + \frac{2\sigma_{-1}-\sigma_0}{\sigma_0}} = \frac{\sigma_{-1}}{\text{tg}\varphi + \frac{2\sigma_{-1}-\sigma_0}{\sigma_0}} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{aSn1L} = \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0(1+R)}{\sigma_0(1-R)}} = \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \text{ctg}\varphi} \quad (3.25)$$

- punctul de intersecție cu dreapta BG:

$$\sigma_{mSn2L} = \frac{\sigma_u}{1 + \frac{2\sigma_u - \sigma_0(1+R)}{\sigma_0(1-R)}} = \frac{\sigma_u}{1 + \frac{2\sigma_u - \sigma_0}{\sigma_0} \text{tg}\varphi} \quad (3.26)$$

$$\sigma_{aSn2L} = \frac{\sigma_u}{\frac{(1+R)}{(1-R)} + \frac{2\sigma_u - \sigma_0}{\sigma_0}} = \frac{\sigma_c}{\text{ctg}\varphi + \frac{2\sigma_c - \sigma_0}{\sigma_0}} \quad (3.27)$$

- punctul de intersecție cu dreapta GC:

$$\sigma_{mSn3L} = \frac{\sigma_c}{2} (1 + R) \quad (3.28)$$

$$\sigma_{aSn3L} = \frac{\sigma_c}{2} (1 - R) \quad (3.29)$$

Cu ajutorul relațiilor prezentate mai sus se pot trasa dreptele AB, BG și GC, pentru anumite valori ale tensiunii de curgere, σ_y , rezistenței la tracțiune, σ_u , limitei la oboseală după un ciclu alternant-simetric, σ_{-1} , limitei la oboseală după un ciclu pulsant, σ_0 precum și pentru anumite valori ale coeficientului de asimetrie a ciclului R, strict determinate de intervalele definite de respectivele drepte. Aceste drepte precum și valorile luate în considerare sunt prezentate în figura 3.13. Tot aici este trasată și parabola Gerber a cărei ecuație este dată de relația (3.25).

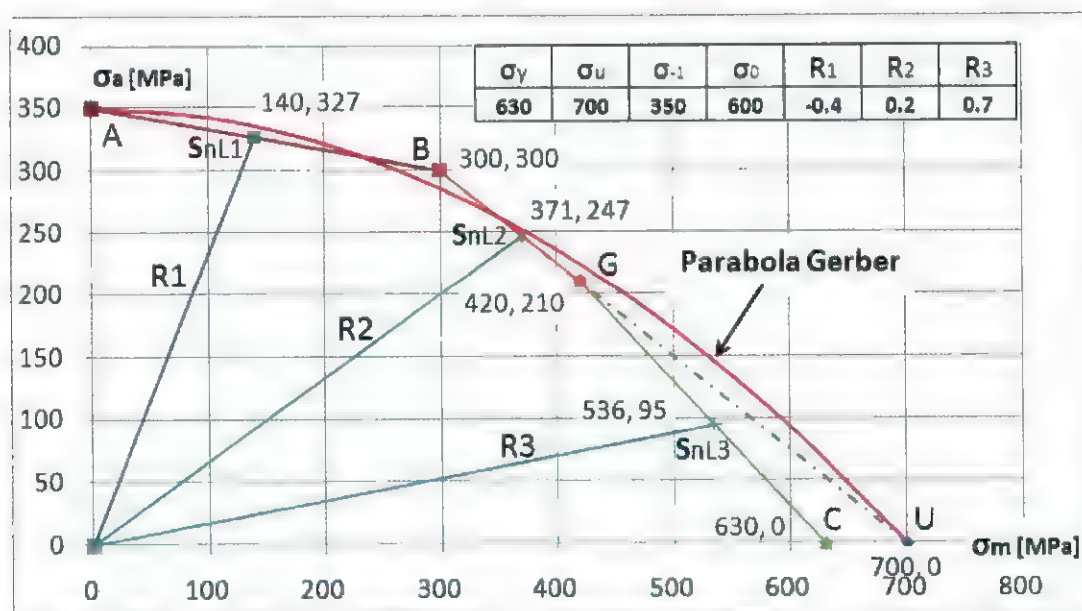


Fig. 3.13. Dreptele rezultate prin schematizarea diagramei Haigh pentru valori predefinite ale tensiunilor

În programul Xcell se vor furniza ecuațiile dreptelor, valorile tensiunilor amintite, coeficienții de asimetrie pe intervale precum și coordonatele punctelor de intersecție ale dreptelor $R=\text{const.}$ cu dreptele AB, BG și GU. Astfel, configurația din *figura 3.13* este prezentată automat. Valorile date pentru tensiuni trebuie să fie pentru același material, condiție în care se respectă anumite proporții între tensiunile σ_u , σ_y , σ_0 și σ_{-1} . De asemenea, coeficienții de asimetrie trebuie să varieze între $[-1,0]$ pentru intersecțiile cu dreapta AB și între $[0,1]$ pentru intersecțiile cu dreptele BG și BC. În aceste condiții, punctele de intersecție S_{nL1} , S_{nL2} și S_{nL3} se vor afla tot timpul pe dreptele AB, BG respectiv GC.

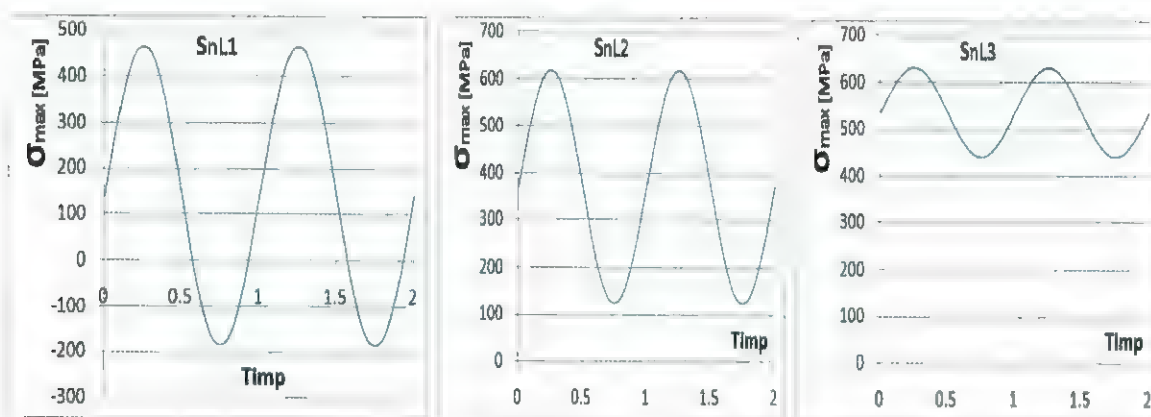


Fig. 3.14. Forma ciclurilor de solicitare corespunzătoare punctelor S_{nL1} , S_{nL2} și S_{nL3}

Diagrama Haigh poate fi schematizată și sub formă neliniară de tipul:

- Schematizarea Gerber a cărei ecuație este:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.25)$$

- Schematizarea de tip elipsă cu ecuația:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.26)$$

- Schematizarea Chester și Dodge cu ecuația:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \right)^q + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.27)$$

unde q este o constantă de material.

- Schematizarea Bagci a cărei ecuație este dată de:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right)^4 = 1 \quad (3.28)$$

Un exemplu de trasare a acestor curbe bazat pe date concrete ale caracteristicilor unui oțel, (σ_y , σ_u și σ_{-1}) este prezentat în *figura 3.15*.

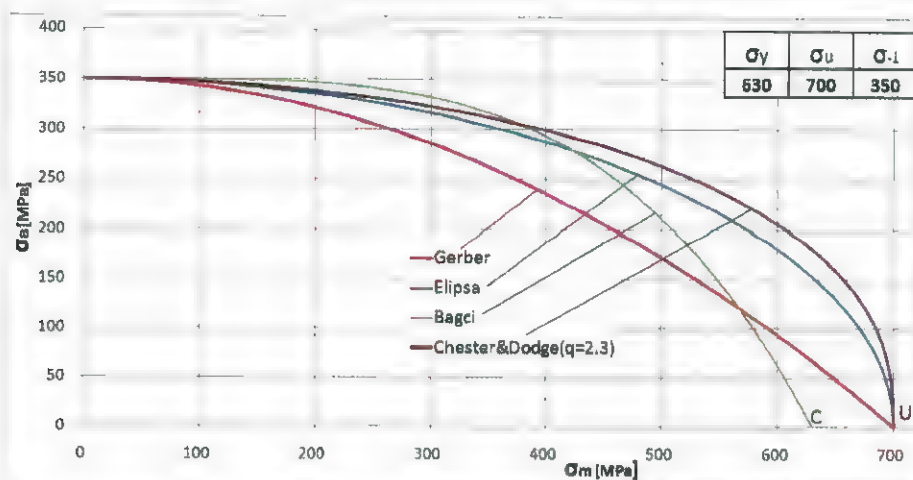


Fig. 3.15. Exemplet de configurare a curbelor de schematizarea diagramei Haigh

3.5.3. Diagrama Smith

Un alt tip de diagramă a rezistențelor la oboseală este *diagrama Smith*, reprezentată în coordonate $(\sigma_m; \sigma_{\max}-\sigma_{\min})$, *figura 3.16*. Diagrama tip Smith reprezintă variația ciclurilor limită de tracțiune - compresie iar orice ciclu este redat printr-o pereche de puncte de aceeași abscisă, egal depărtate fiind de axa la 45° .

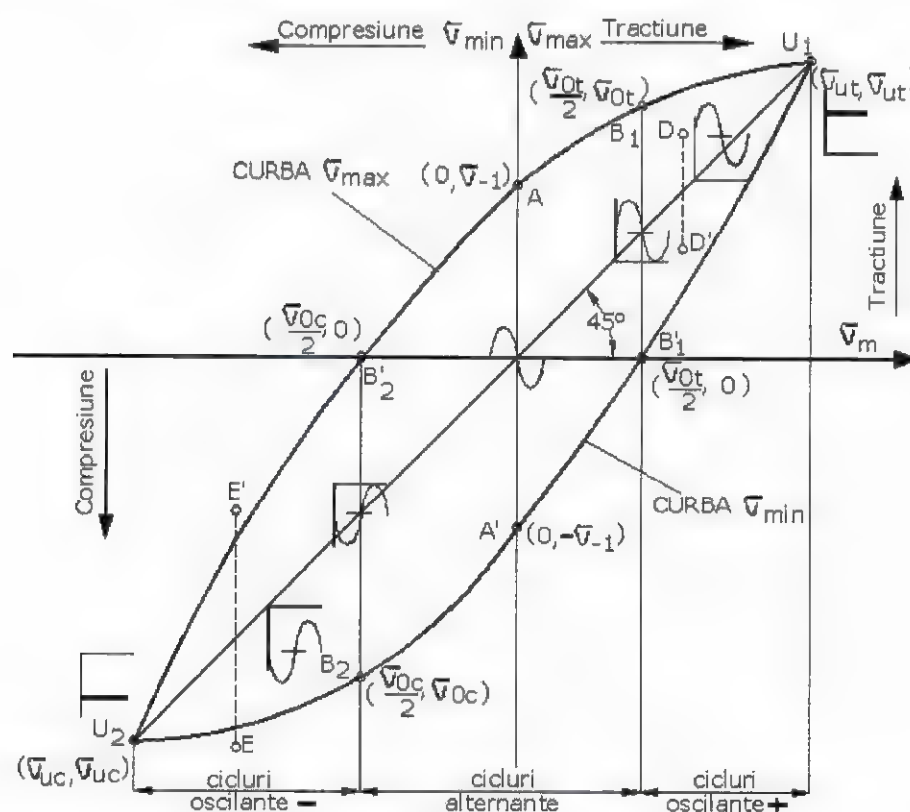


Fig. 3.16. Diagrama Smith

Ciclurile limită sunt reprezentate prin punctele situate pe curbele notate în *figura 3.16* cu σ_{\max} și σ_{\min} . Pot fi puse în evidență următoarele cicluri semnificative:

AA': - ciclu alternant simetric de tracțiune-compresiune;

B₁B'₁: - ciclu pulsant pozitiv de tracțiune;

B₂B'₂: - ciclu pulsant negativ de compresiune;

U₁ și U₂: - solicitari statice de tracțiune și de compresiune, la limita de rupere;

DD': - ciclu nepericulos;

EE: - ciclu periculos, care produce ruperea prin oboseală.

Trasarea acestei diagrame necesită foarte multe încercări experimentale. Practic este destul de dificil de a obține, din determinări experimentale, date necesare pentru cât mai multe puncte de pe curbele σ_{\max} și σ_{\min} , pentru ca acestea să fie trasate cu o cât mai bună fidelitate. Din acest motiv se utilizează o diagramă schematizată ce utilizează un număr redus de mărimi caracteristice, la solicitări statice și de oboseală.

Schematizarea diagramei Smith constă din trasarea de drepte între puncte cunoscute și care pot fi obținute cu ușurință. Pentru trasarea acestei diagrame sunt necesare: rezistența la oboseală pentru ciclu alternant simetric, σ_{-1} , limita de curgere, σ_c și rezistența la oboseală pentru ciclul pulsant σ_0 . Toate aceste caracteristici de material, necesare trasării diagramei Smith schematizate, sunt relativ ușor de obținut, ceea ce face ca acest tip de diagramă să fie foarte mult utilizată în calculele de rezistență. Din aceste diagrame se utilizează în calcule, în mod special, cele trei caracteristici de material amintite anterior. Forma diagramei Smith, schematizate, partea ei de tracțiune, este prezentată în figura 3.17.

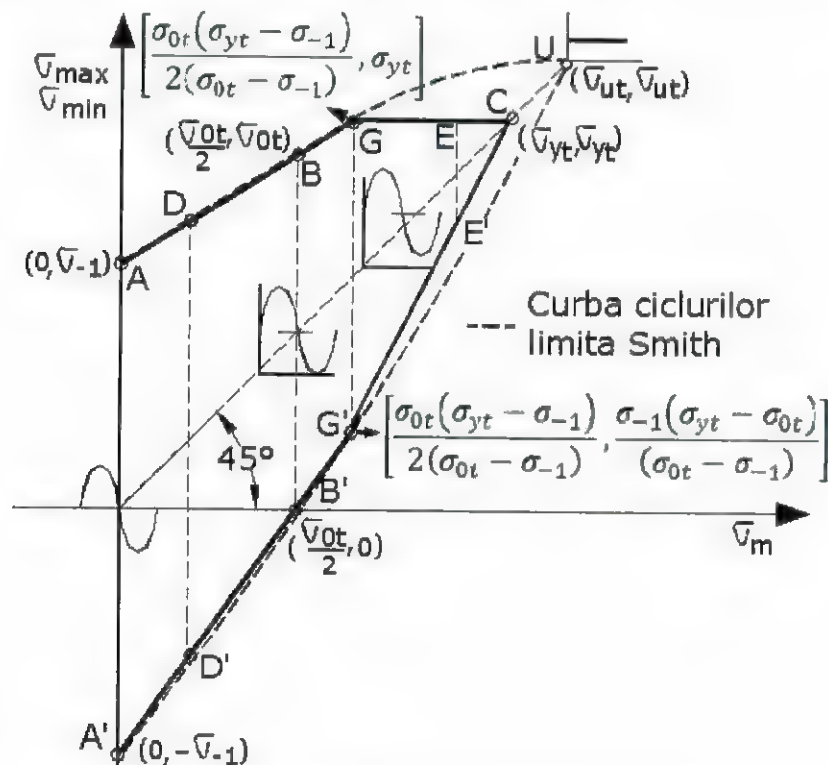


Fig. 3.17. Schematizarea diagramei Smith

Ecuațiile celor patru drepte ce delimitează zona interioară în care epruvetele nu se rup, sunt următoarele (pe domeniul delimitat de punctele de capăt):

- Dreapta AB (AG):

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{-1t}} + \frac{\sigma_m}{\frac{\sigma_{0t}\sigma_{-1t}}{2(\sigma_{-1t} - \sigma_{0t})}} = 1$$

- Dreapta GC:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{yt}} = 1$$

- Dreapta A'B' (A'G'):

$$\frac{\sigma_m}{\frac{\sigma_{0t}}{2}} - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{-1t}} = 1$$

- Dreapta G'C:

$$\frac{\sigma_{min} - \sigma_y}{\sigma_m - \sigma_y} = 2 \frac{\sigma_{-1}(\sigma_{yt} - \sigma_0) - \sigma_y(\sigma_0 - \sigma_{-1})}{\sigma_0(\sigma_{yt} - \sigma_{-1}) - 2\sigma_y(\sigma_0 - \sigma_y)}$$

Atunci când se stabilește un coeficient de asimetrie a ciclului, R, vor rezulta tensiunile σ_{max} , σ_m și σ_{min} , corespunzătoare celor două zone (AG și GC, respectiv A'G' și G'C) date de relațiile:

- relație între σ_{max} , σ_m și R:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{max}} = \frac{R + 1}{2}$$

- relație între σ_{min} , σ_m și R:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{min}} = \frac{R + 1}{2R}$$

- punctul D:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{0t}\sigma_{-1}}{\sigma_{-1} + R(\sigma_{-1} - \sigma_{0t})} \frac{R + 1}{2}; \quad \sigma_{max} = \frac{\sigma_{0t}\sigma_{-1}}{\sigma_{-1} + R(\sigma_{-1} - \sigma_{0t})}$$

- punctul D':

$$\sigma_m = \frac{1}{\frac{R + 1}{R\sigma_{0t}} - \frac{1}{\sigma_{-1}}} \frac{R + 1}{2R}; \quad \sigma_{min} = \frac{1}{\frac{R + 1}{R\sigma_{0t}} - \frac{1}{\sigma_{-1}}}$$

Tensiunea medie σ_m , atât pentru punctul D cât și pentru punctul D' are aceeași valoare.

- punctul E:

$$\sigma_m = \sigma_{yt} \frac{R + 1}{2}; \quad \sigma_{max} = \sigma_{yt}$$

- punctul E':

$$\sigma_m = \sigma_{yt} \frac{R + 1}{2}; \quad \sigma_{min} = \sigma_{yt} R$$

Tensiunea medie σ_m , atât pentru punctul E cât și pentru punctul E' are aceeași valoare.

Cu ajutorul relațiilor prezentate mai sus se pot trasa dreptele AB, BC, A'B' și b'CC, pentru anumite valori ale limitei la oboseală după un ciclu alternant-simetric, σ_{-1} , limitei la oboseală după un ciclu pulsant, σ_0 , tensiunii de curgere, σ_y , precum și pentru anumite valori ale coeficientului de asimetrie a ciclului R. Aceste drepti precum și valorile luate în considerare sunt prezentate în figura 3.18 și sunt trasate în mod automat prin programul Xcell în care s-au introdus ecuațiile dreptelor descrise mai sus.

Evident că valorile date trebuie să fie pentru același material, condiție în care se respectă anumite proporții între tensiunile σ_y , σ_0 și σ_{-1} . De asemenea, coeficienții de asimetrie trebuie să varieze între $[-1,0]$ pentru intersecțiile cu dreptele AB și AB' și între $[0,1]$ pentru intersecțiile cu dreptele BC și B'C. În aceste condiții, punctele D și D' se vor afla tot timpul pe dreptele AB respectiv AB' în timp ce punctele E și E' se vor afla tot timpul pe dreptele BC respectiv B'C.

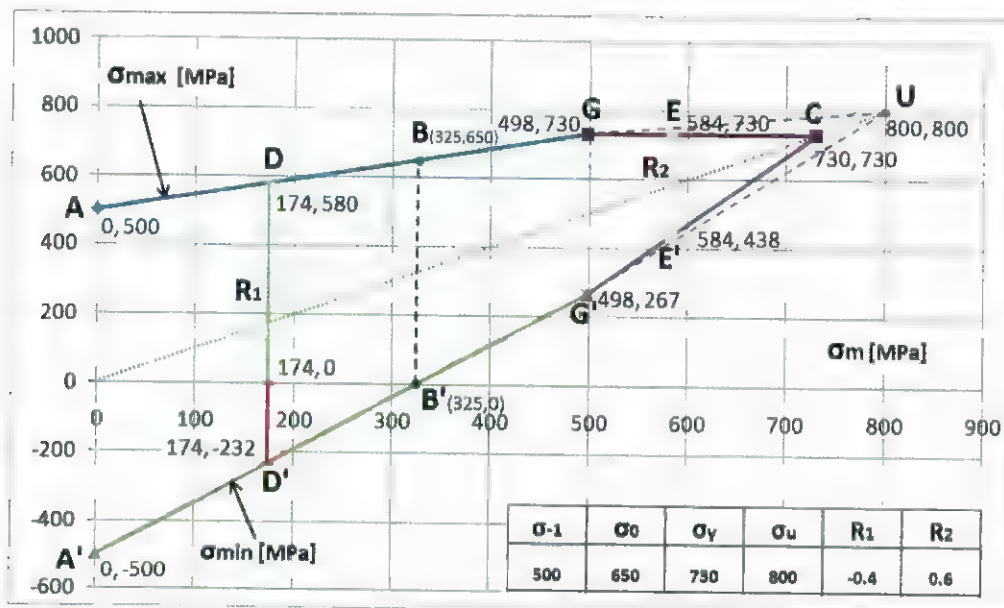


Fig. 3.18. Dreptele rezultate prin schematizarea diagramei Smith pentru valori predefinite ale tensiunilor și coeficientului de asimetrie

În aceste condiții, ciclurile determinate de punctele A-A', ca și punctele de intersecție ale dreptelor $R_1 = -0,4$ și $R_2 = 0,6$ cu dreptele de schematizare ale diagramei Smith vor conduce la ciclurile de tipul celor prezentate în figura 3.19.

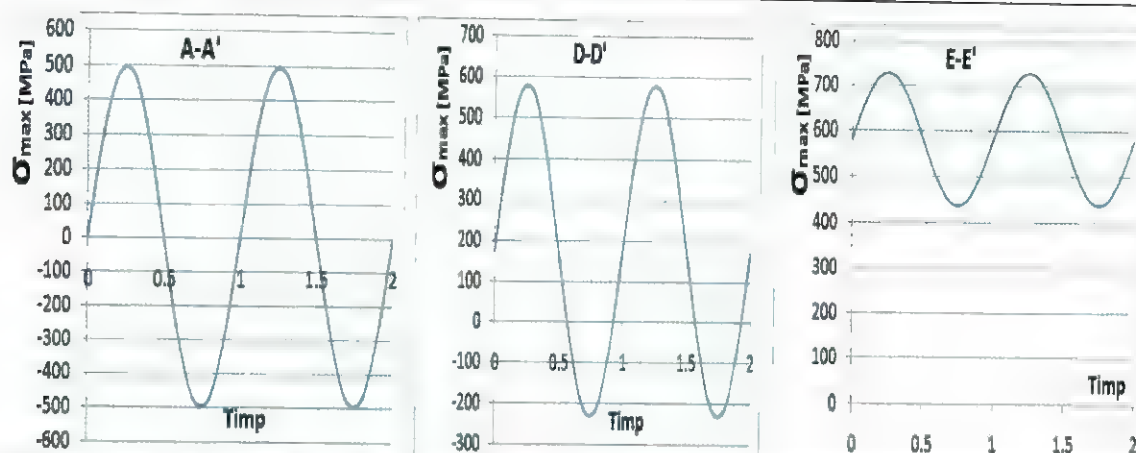


Fig. 3.19. Forma ciclurilor de solicitare corespunzătoare punctelor A-A', D-D' și E-E'

3.6. Efectele factorilor de solicitare

3.6.1. Influența tensiunii medii

Majoritatea rezultatelor experimentale existente în literatura de specialitate au fost determinate pentru cicluri simetrice ($R=-1$). Pentru o tensiune medie σ_m diferită de zero se produce o translație a curbei de durabilitate pe direcția axei de solicitare.

Observație: toate valorile tensiunilor din acest subcapitol sunt tensiuni limită.

De cele mai multe ori, efectul tensiunii medii produs asupra comportării la oboseală se pune în evidență trasând diagrame de tip Wöhler în coordonate σ_a-N , (σ_a fiind amplitudinea solicitării) pentru diferite valori ale solicitării medii σ_m , luate ca parametru. Din studiul acestor diagrame rezultă faptul că, tensiunile medii pozitive micșorează durata de viață a probelor în timp ce tensiunile medii negative o prelungesc.

În mod frecvent, în activitatea de proiectare se utilizează diagrame de tip Haigh, care stabilesc corelația dintre parametrii σ_a și σ_m ai solicitării pentru care se obține o durată de viață constantă. Acest tip de diagrame se pot obține pe baza diagramelor de durabilitate σ_a-N_f , (N_f fiind numărul de cicluri până la rupere) determinate experimental pentru diferite valori σ_m luate ca parametru.

Un alt procedeu utilizat pentru punerea în evidență a efectului tensiunilor medii este descris în cele ce urmează. Se aleg diferite valori ale coeficientului de asimetrie R . Pentru fiecare dintre acestea se determină rezistența la oboseală la diferite valori date ale duratei de viață. Pe baza rezultatelor astfel obținute se trasează o familie de curbe în coordonate $\sigma_a-\sigma_m$ sau $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ considerând durata de viață ca parametru. Din examinarea acestor curbe se poate concluziona că, R are același efect asupra curbelor $\sigma-N$ ca și cel dat de tensiunea medie. Ca urmare, la o valoare constantă pentru coeficientul de asimetrie R al ciclului, curbele $\sigma-N$ furnizează aceleași informații ca și cele obținute pentru $\sigma_m=\text{constant}$. Diagramele trasate pentru o durată de viață constantă pot fi prezentate fie în coordonate $\sigma_a-\sigma_m$ fie în coordonate $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$. Cele două tipuri de diagrame sunt identice, dacă se rotesc cu 45° , obținându-se diagrama din figura 3.20.

Din aceste diagrame se poate obține, prin interpolare, durata de viață pornind, fie de la perechea de valori (σ_a , σ_m) fie de la perechea de valori (σ_{\max} , σ_{\min}). Se observă că, în cele două sisteme de coordonate, condiția $R=\text{const.}$ reprezintă o dreaptă ce trece prin origine. Această dreaptă reprezintă locul geometric al ciclurilor asemenea dar având durată de viață diferită.

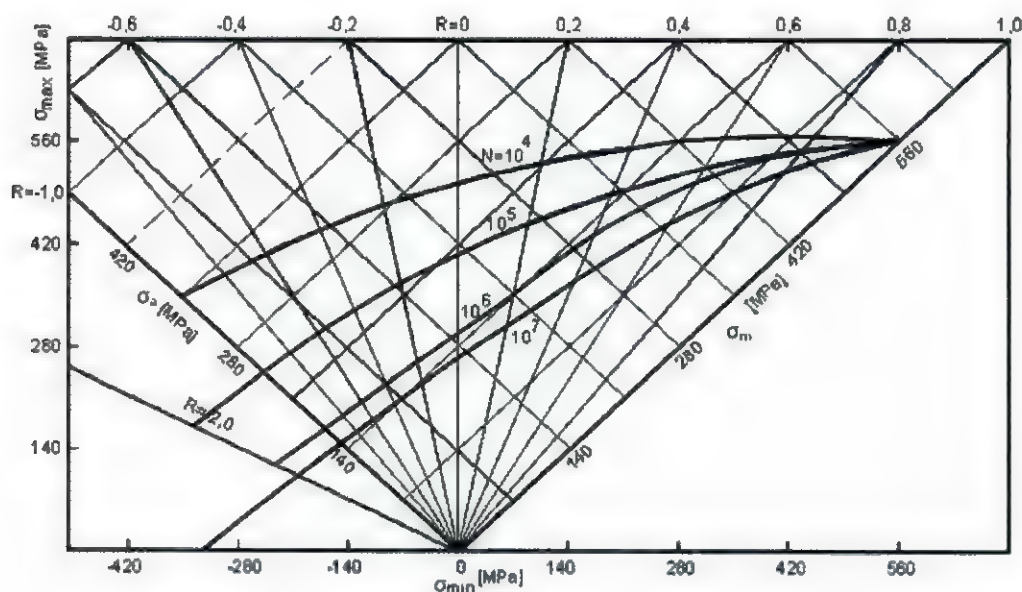


Fig. 3.20. Diagramele în coordonate σ_a - σ_m și σ_{\max} - σ_{\min}

O diagramă reprezentativă pentru epruvetele fără concentrator este diagrama de tip Haigh din figura 3.21. Ea se obține comparând două cicluri de oboseală ce conduc la aceeași durată de viață, unul având un coeficient de asimetrie R , celălalt fiind simetric ($R=-1$). Amplitudinile tensiunilor pentru cele două cicluri au fost notate cu σ_a (ciclul cu coeficient de asimetrie R) respectiv σ_{as} (ciclul simetric), iar solicitarea medie (tensiunea medie) a ciclului nesimetric cu σ_m .

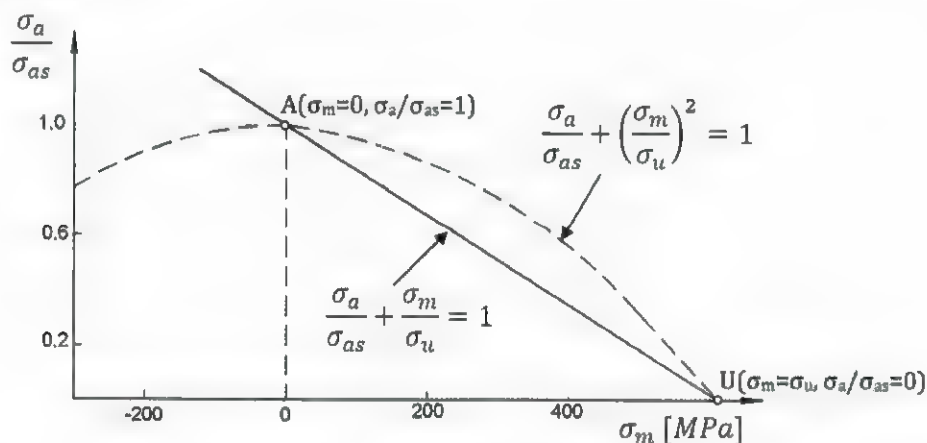


Fig. 3.21. Diagrama Haigh în coordonate σ_a/σ_{as} - σ_m

Indiferent de forma funcției $\sigma_a/\sigma_{as}=f(\sigma_m)$, graficul acesteia trece prin două puncte: $A(\sigma_m=0, \sigma_a/\sigma_{as}=1)$ ce corespunde ciclului simetric și $U(\sigma_m=\sigma_u, \sigma_a/\sigma_{as}=0)$ ce corespunde rupei statice. Graficul funcției amintite poate fi schematizat prin linia dreaptă AU de ecuație:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.29)$$

Această schematizare pare justificată pentru materiale ductile dar conduce la estimări eronate ale duratei de viață datorită gradului de supra-securitate pe care îl introduce. Pentru ciclurile ce au tensiunea medie negativă, linia AU poate fi continuată dar, de cele mai multe ori, se consideră că tensiunile medii negative nu aduc beneficii în calculul la oboseală și, ca atare, linia AU se continuă de regulă cu o orizontală de ordonată 1.

Au fost propuse și ecuații mai complicate decât dependențele liniare date de *ecuația (3.29)*. Una dintre acestea este ecuația parabolică de tipul:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (3.30)$$

Reprezentarea liniară a diagramei ciclurilor limită a fost propusă de Goodman iar cea parabolică de Gerber.

Ecuațiile cu ajutorul cărora sunt descrise diagramele de forma $\sigma_a = f(\sigma_m)$ sunt folosite pentru estimarea nivelului valorilor σ_a pentru toate curbele de durabilitate σ -N deci și pentru cele care corespund unor valori ale tensiunii medii pentru care nu există date experimentale. De exemplu, dacă pentru o componentă a unei structuri este necesară determinarea duratei de viață ținând seama de tensiunea medie, și nu se cunoaște decât curba de durabilitate σ -N determinată pentru ciclul simetric, atunci se rezolvă *ecuația (3.93)* în raport cu σ_{as} și apoi se determină durata de viață din diagrama existentă. În acest fel, orice pereche de valori (σ_a, σ_m) conduce la aceeași durată de viață ca și σ_{as} corespunzătoare acestora, determinată de ecuația respectivă. Efectul suprasolicitărilor de scurtă durată.

Uneori, în timpul funcționării, în piese apar solicitări variabile de scurtă durată având amplitudinea tensiunii mai mare decât limita la oboseală a materialului. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală a fost studiat experimental astfel: pentru o perioadă scurtă s-a încărcat o epruvetă cu o tensiune mai mare decât limita la oboseală. După descărcare epruveta a fost supusă la o solicitare ciclică având amplitudinea tensiunii egală cu limita la oboseală și s-a determinat numărul de cicluri N_0' la care aceasta s-a rupt.

Suprasolicitările pentru care rezultă $N_0' \geq N_0$ în care N_0 este durabilitatea neconvențională se numesc nepericuloase; acestea sunt prezentate grafic prin dreapta DB din *figura 3.22* în care linia frântă ABC reprezintă schematizarea curbei de durabilitate. Suprasolicitările pentru care rezultă $N_0' < N_0$ se numesc periculoase și sunt reprezentate prin punctele cuprinse între dreptele DB și AB. Punctele situate între dreptele DB și EB corespund unor suprasolicitări favorabile, deoarece, aplicate pieselor conduc la creșterea limitei la oboseală.

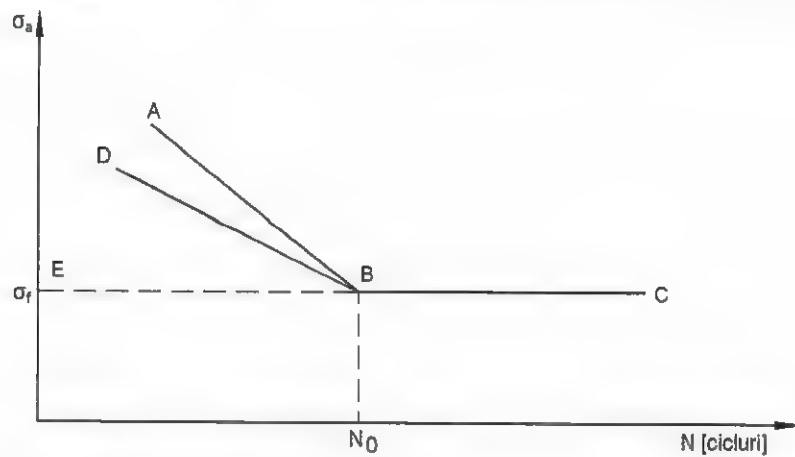


Fig. 3.22. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală

Un efect similar este produs de fenomenul de antrenare. S-a observat că, creșterea progresivă în trepte infimitezimale a amplitudinii solicitării de la valori inferioare limitei de oboseală la valori mult superioare acesteia poate conduce la creșterea durabilității. Această operație necesită parcurgerea unui număr mare de cicluri de solicitare controlate cu precizie, de aceea metoda este greu de aplicat în mod practic. Ea servește însă ca bază teoretică pentru procedeele tehnologice de detensionare prin vibrație a structurilor realizate prin sudare.

Bibliografie

CAPITOLUL 4. FACTORI CARE INFLUENȚEAZĂ REZISTENȚA LA OBOSEALĂ

-
- 4.1. Factorul de concentrare a tensiunilor la solicitări statice
 - 4.2. Definiția K_t în domeniul elastic
 - 4.3. Efectul geometriei concentratorului asupra coeficientului de concentrare a tensiunilor K_t
 - 4.4. Metode pentru determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor
 - 4.5. Efectul concentrării tensiunilor la solicitări de oboseală
 - 4.6. Influența dimensiunilor piesei asupra limitei la oboseală
 - 4.7. Influența calității suprafeței asupra limitei la oboseală
-

Rezistența la oboseală este influențată de un număr mare de factori. Aceștia pot fi grupați în câteva categorii principale:

- Factori constructivi, care țin de forma și dimensiunile pieselor;
- Factori tehnologici, în care intră structura materialului, tehnologia de fabricație, gradul de finisare a suprafețelor, tratamentele termice aplicate pieselor, etc.;
- Factori ce țin de condițiile de exploatare: tipul solicitării, condițiile de mediu, temperatura de lucru, condiții meteorologice extreme, etc.

4.1. Factorul de concentrare a tensiunilor la solicitări statice

Calculul de rezistență ale unei structuri sunt bazate, în primul rând, pe teoria elasticității. În cazul în care se depășește limita de curgere σ_y , apare deformarea plastică, și, ca urmare, trebuie utilizate teorii mai complexe ce trebuie să țină seama de apariția plasticității. Oboseala, ca și acțiunea factorilor de mediu cum ar fi coroziunea și tensiunea ce apare în jurul concentratorilor determinați de aceasta, sunt fenomene care apar la niveluri scăzute ale tensiunii, care, pentru solicitarea statică, reprezintă zona domeniului elastic. Comportamentul macroscopic, elastic, al materialului izotrop este caracterizat de trei constante elastice: modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young (E), modulul de elasticitate transversal sau de forfecare (G) și coeficientul lui Poisson (ν). Relația bine-cunoscută între aceste constante este: $E = 2G(1 + \nu)$.

Într-o structură, abaterile geometrice de la forma netedă a pieselor componente ca și trecerile cu variații de geometrie nu pot fi evitate. Toate aceste variații geometrice poartă numele de **concentratori de tensiune**. Acești concentratori cauzează o distribuție neomogenă a stării de tensiuni, *figura 4.1*, cu valoarea mai mare a tensiunii la trecerea de la zona fără concentrator la zona cu concentrator. Coeficientul teoretic de concentrare a

tensiunilor, K_t (**pentru solicitarea statică**) este definit ca raportul dintre tensiunea de la baza concentratorului și tensiunea nominală care ar fi fost prezentă în același punct dacă nu ar fi fost prezent concentratorul de tensiune:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nominal}}} \quad (4.1)$$

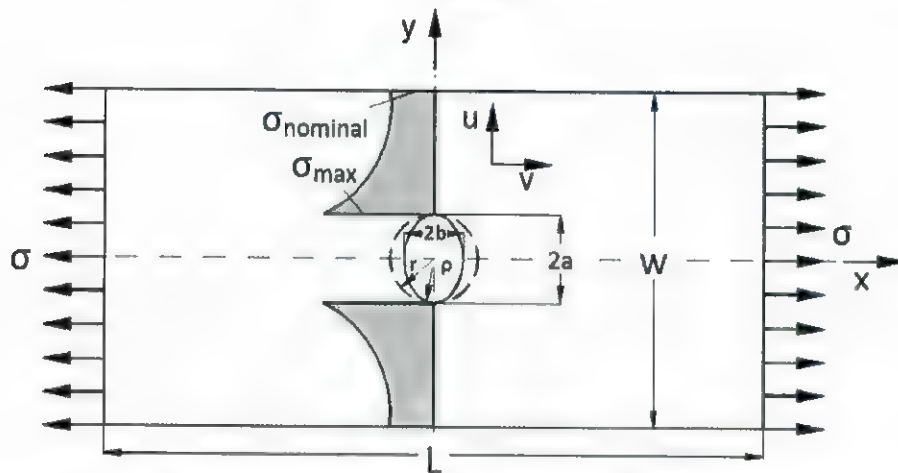


Fig. 4.1. Placă cu concentrator eliptic (circular) străpuns, solicitată la tracțiune monoaxială

Pentru tensiunea de la trecerea dintre zona cu concentrator și zona fără concentrator, tensiunea maximă este dată de relația:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (4.2)$$

în care σ reprezintă tensiunea într-o secțiune similară cu cea în care există concentratorul, dar mai depărtată de acesta, (σ poate fi egală și cu σ_{nominal}), a și b sunt dimensiunile semiaxelor elipselor iar ρ reprezintă raza la vârful elipsei, $\rho = \frac{b^2}{a}$. Dacă $\sigma = \sigma_{\text{nominal}}$, din relația 4.2 se deduce că valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor, pentru un concentrator eliptic, este dată de relația:

$$K_t = \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (4.3)$$

Dacă semiaxele elipsei devin egale, $a=b=r$, și, ca urmare, concentratorul devine circular, va rezulta $K_t=3$. Așadar, valoarea tensiunii în imediata vecinătate a unui concentrator circular va fi de trei ori mai mare decât valoarea tensiunii într-o secțiune similară dar fără concentrator. Din relația 4.3. se constată următoarele:

- dacă $a \ll b$, $K_t \rightarrow 1$, ce reprezintă **cazul fără concentrator** întrucât a rămâne tot timpul, prin definiție, axa mare a elipsei;
- dacă $b \rightarrow 0$ avem cazul unei **fisuri transversale** și se deduce că $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$, ceea ce nu poate fi adevărat în cazul real. În acest caz, tensiunea de la vârful unui astfel de

concentrator (de tip fisură) trebuie determinată pe baza elementelor furnizate de Mecanica ruperii.

Coefficientul teoretic de concentrare a tensiunilor depinde numai de tipul sollicitării și de geometria piesei, nedepinzând de natura materialului. Având în vedere aceste considerente, proiectanții ar trebui să limiteze acțiunea concentratorilor de tensiune, mai ales în cazul sollicitării la oboseală.

4.2. Definiția K_t în domeniul elastic

Mai jos se vor da câteva exemple de calcul analitic al coeficienților de concentrare a tensiunilor, **în domeniul elastic**, pentru câteva situații concrete.

Pentru cazurile mai complexe, când calculul analitic devine prea laborios, se poate recurge la alte metode de determinare:

- metoda elementelor finite;
- prin determinări experimentale: măsurători cu mărci tensometrice sau cu ajutorul fotoelasticității.

Soluțiile analitice pentru calculul coeficientului teoretic de concentrare a tensiunilor, bazate pe teoria elasticității se bazează pe determinarea funcțiilor de deplasare $u(x,y)$ și $v(x,y)$. Dacă se pot obține aceste funcții, pe baza lor se determină deformațiile specifice iar prin intermediul legii lui Hooke se determină și tensiunile. O parte din găsirea respectivei soluții o reprezintă determinarea deformațiilor specifice $\epsilon_x(x,y)$, $\epsilon_y(x,y)$ și $\gamma_{xy}(x,y)$, care trebuie să satisfacă ecuația de compatibilitate. În plus, trebuie satisfăcute ecuațiile de echilibru între tensiunile σ_x , σ_y și σ_z , luându-se în considerare și legătura existentă între constantele elastice ale materialului. Ecuațiile obținute sunt rescrise prin introducerea funcției de tensiuni Φ dată de Airy, ceea ce conduce la o ecuație biarmonică. Soluția ecuației astfel determinate conține necunoscute ce trebuie determinate prin impunerea condițiilor la limită.

Pentru concentratorul din *figura 4.1* aceste condiții la limită sunt:

- a) pentru $x=\pm L/2 \rightarrow \sigma_x = \sigma$, $\sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$;
- b) pentru $y=\pm w/2 \rightarrow \sigma_x = 0$, $\sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$;
- c) pentru $y=\pm r \rightarrow \sigma_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$.

Este evident că tensiunea cea mai mare se înregistrează în imediata vecinătate a concentratorului. Pe măsură ce ne depărtăm de acesta, tensiunea scade după o anumită lege de variație, *figura 4.2*. De această variație se ține seama atunci când se ia în considerare efectul dimensiunii pieselor cu concentrator asupra limitei la oboseală. Pentru un concentrator eliptic străpuns într-o placă infinită sollicitată monoaxial, soluția exactă pentru tensiunea $(\sigma_x)_{x=0}$, luată de-a lungul axei y , este dată de relația:

$$(\sigma_x)_{x=0} = \sigma \left(1 + \frac{a(a-2b)(y - \sqrt{y^2 - c^2})(y^2 - c^2) + ab^2(a-b)y}{(a-b)^2(y^2 - c^2)\sqrt{y^2 - c^2}} \right) \quad (4.4)$$

unde $c^2 = a^2 - b^2$.

Pentru $y = a$, ecuația se reduce la ecuația (4.2). La distanță relativ mare de concentrator, respectiv pentru valori mari ale lui y , va rezulta $(\sigma_x)_{x=0} = \sigma$.

Pentru un concentrator circular de rază r , se poate scrie relația:

$$(\sigma_x)_{x=0} = \sigma \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{y} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{r}{y} \right)^4 \right) \quad (4.5)$$

Din relația (4.5) se constată că, pentru $y=r$, tensiunea în imediata vecinătate a găurii (concentratorului circular) este: $(\sigma_x)_{x=0, y=r} = 3\sigma$.

Distribuțiile tensiunii $(\sigma_x)_{x=0}$, pentru un concentrator eliptic cu $a/b=3$, respectiv $K_t = 7$ și pentru un concentrator circular de rază $r=a=b$, sunt prezentate în figura 4.2. Tensiunea la vârful concentratorului eliptic este mai mare dar scade mai puternic pe direcția axei y , pe măsură ce ne depărtăm de concentrator.

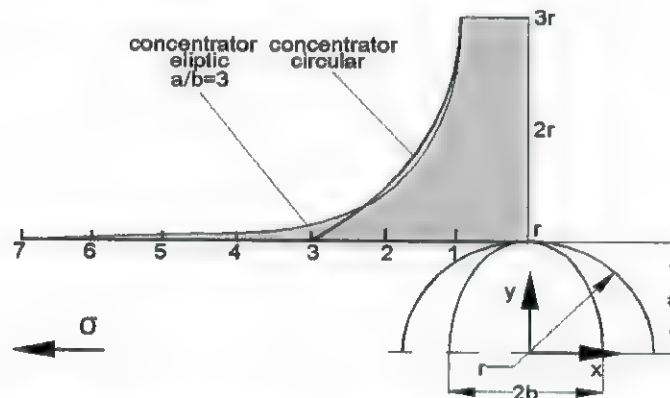


Fig. 4.2. Distribuția tensiunii σ_x pe axa y , în dreptul unui concentrator eliptic și a unui concentrator circular

4.3. Efectul geometriei concentratorului asupra coeficientului de concentrare a tensiunilor K_t

Pentru placa plană din figura 4.1, din punct de vedere al geometriei acesteia îi sunt caracteristice trei dimensiuni: lățimea W , lungimea L și diametrul găurii $2r$. Mărimea K_t este adimensională și, ca urmare, nu trebuie să depindă de valoarea dimensiunilor ci doar de raportul acestora. Presupunem că avem aceeași piesă din figura 4.1 dar cu dimensiunile de două ori mai mari, respectiv $2W$, $2L$ și $2r$, figura 4.3.

Dacă s-ar trasa câte o curbă caracteristică tensiune-deformație pentru fiecare din cele două probe, acestea ar trebui să fie identice. Ca urmare, în cele două probe ar trebui să avem o aceeași distribuție a tensiunilor în cele două piese. La nivelul concentratorului de tensiune vom găsi, într-adevăr, aceeași tensiune, σ_{max} , și, ca urmare, valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor, K_t va fi aceeași. Cu toate acestea, variația tensiunilor plecând de la concentrator nu este aceeași, această variație nefiind adimensională.

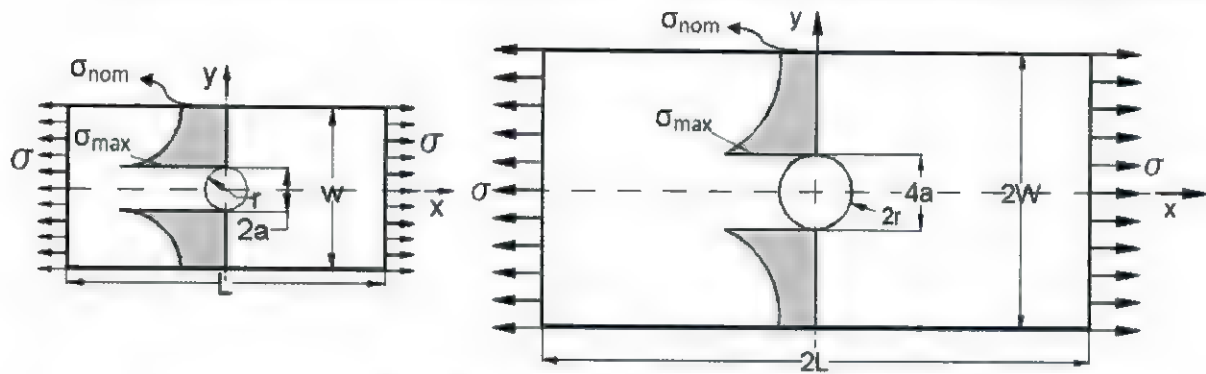


Fig. 4.3. Plăci cu aceeași geometrie, dimensiuni diferite, același K_t și variații diferite ale tensiunii

Pentru probele cu volume mai mari și concentrator de dimensiune mai mare, avem o zonă mai mare de material supus la tensiuni ridicate, ceea ce, pentru fenomenul de oboseală, este determinant.

Graficele pentru determinarea valorii pentru K_t în funcție de forma și dimensiunile geometrice ale concentratorului sunt asemănătoare cu cele prezentate în figurile 4.4, 4.5 și 4.6. Mai multe grafice pentru diferite forme și diferite tipuri de încărcare pot fi găsite în [1,2,3].

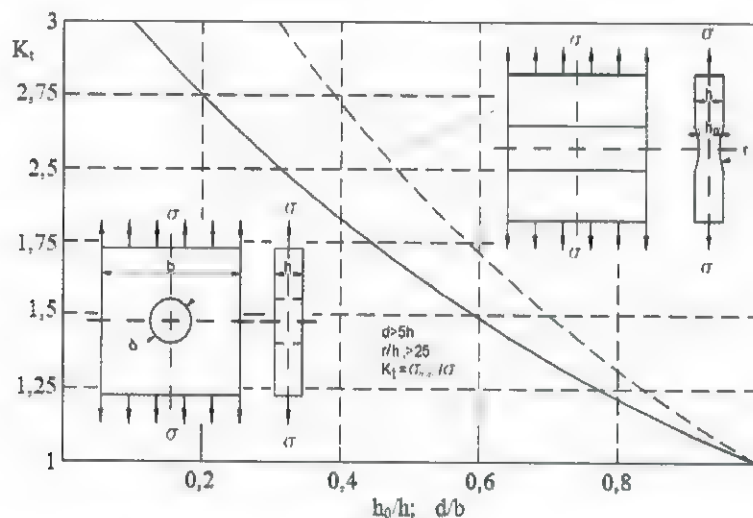


Fig. 4.4. Variația K_t pentru o placă cu concentrator circular central sau teșitură transversală supusă la tracțiune monoaxială

Din figurile 4.4 și 4.5 se constată că, atunci când raza de curbură a concentratorului crește, valorile pentru K_t devin din ce în ce mai mici, mai mari fiind pentru concentratorul circular central în raport cu concentratorul circular lateral. Din figura 4.6 se constată că, o rază de racordare mai mare între cele două secțiuni de mărime diferită conduce la micșorarea valorilor pentru K_t . Tot o reducere a acestor valori se produce și atunci când diferența dintre dimensiunile cele două secțiuni scade. Tot din această figură se constată că valoarea concentratorului de tensiune poate fi scăzută de la 3 la 1,26 dacă dimensiunile secțiunilor transversale sunt apropiate și dacă raza de racordare între acestea este mare.

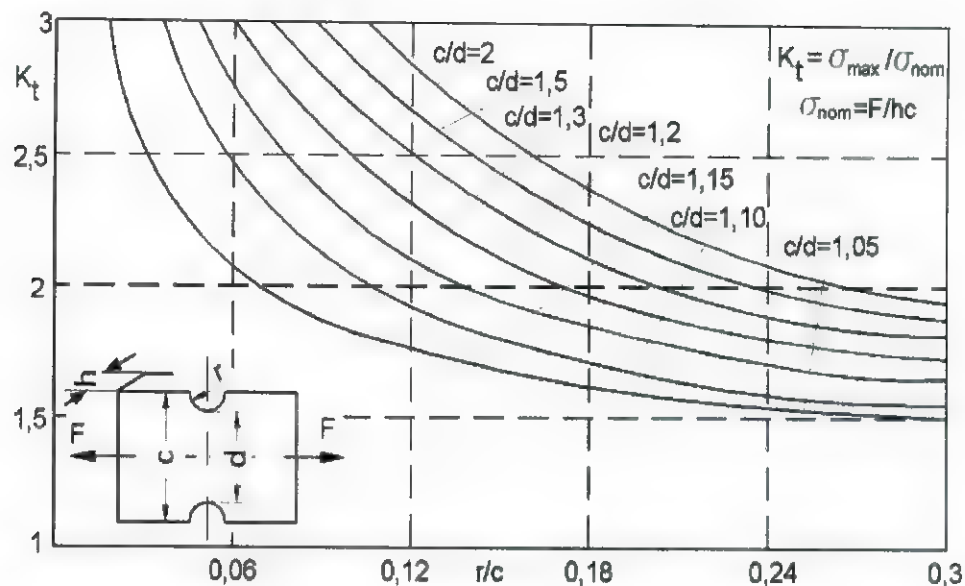


Fig. 4.5. Variația K_t pentru o placă cu concentrator semicircular lateral supusă la tracțiune monoaxială; h -grosimea plăcii

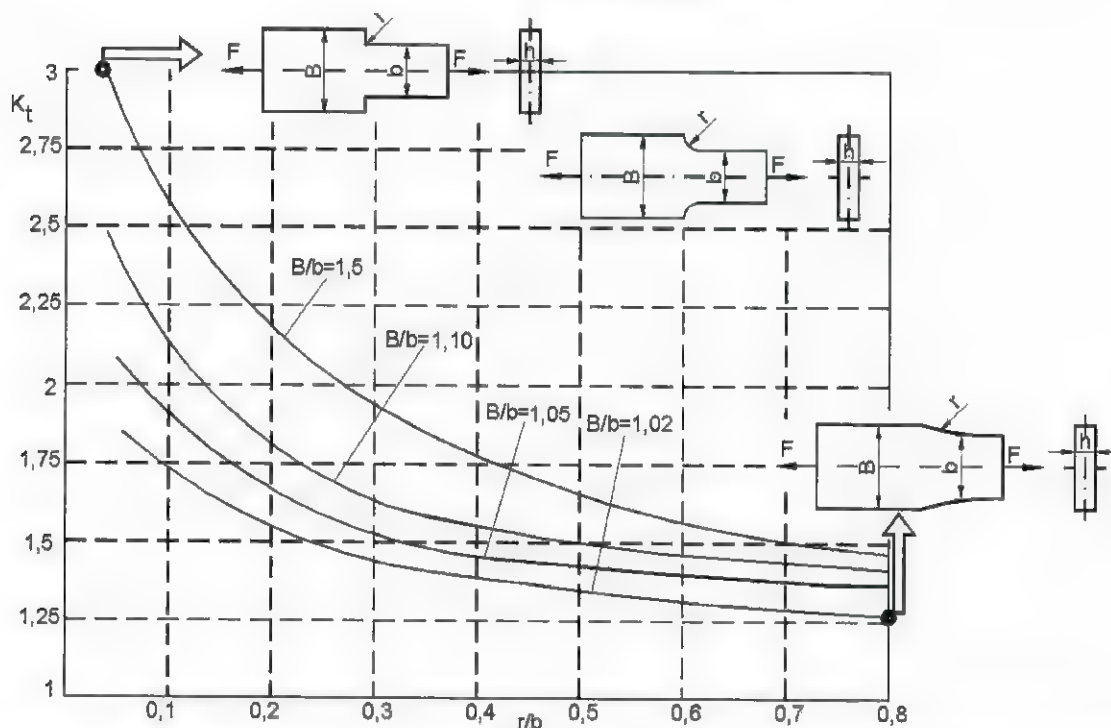


Fig. 4.6. Variația K_t pentru o placă cu variație a secțiunii transversale supusă la tracțiune monoaxială

În figura 4.7 sunt prezentate trei forme geometrice diferite, având concentratori de aceeași dimensiune. Se constată că valoarea cea mai mare a factorului de concentrare a tensiunilor, K_t , se înregistrează pentru creștătura laterală, figura 4.7a. În dreapta se pot vedea direcțiile tensiunilor principale care sunt deviate în imediata vecinătate a concentratorului. Se observă că liniile de tensiune sunt puternic distorsionate în dreptul creștăturii, de aici și valoarea mai mare pentru factorul de concentrare a tensiunii.

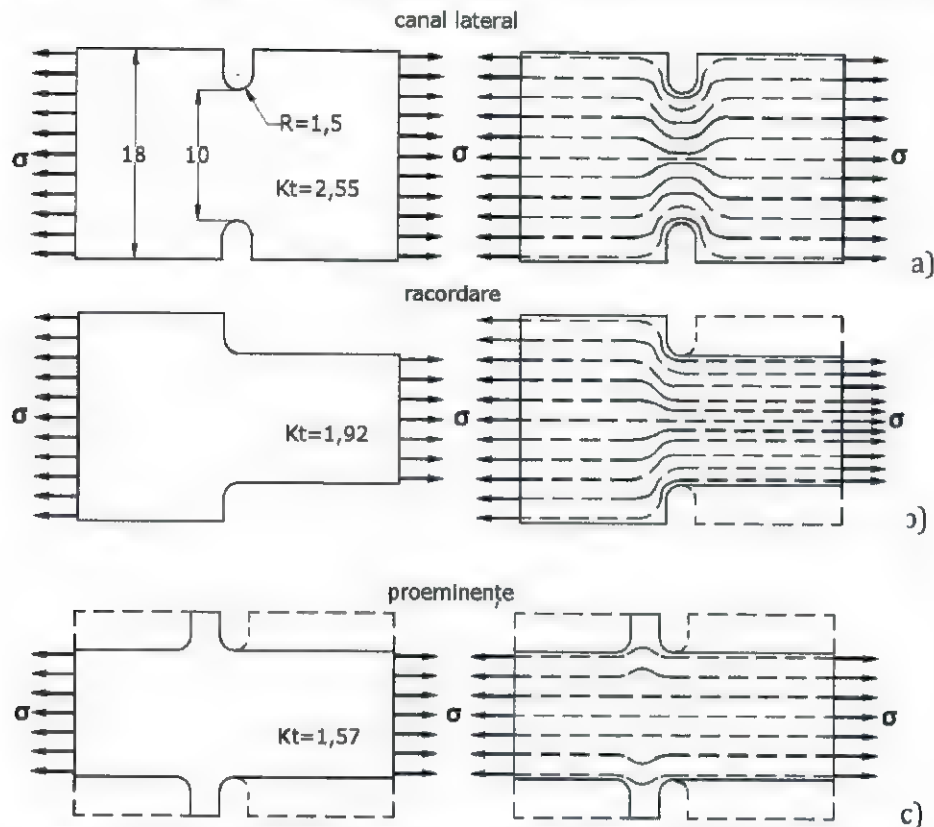


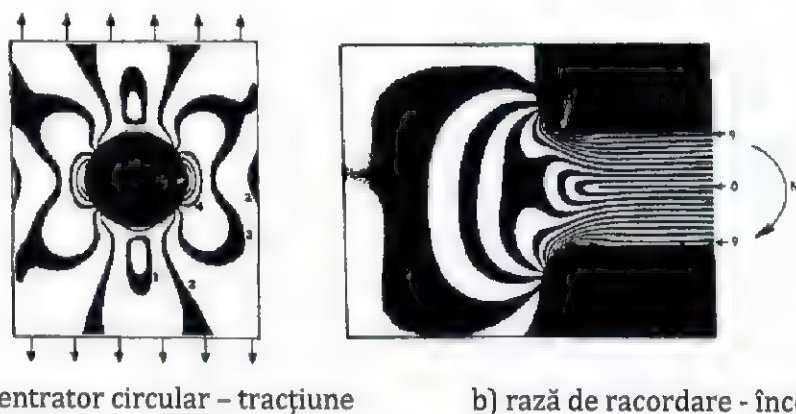
Fig. 4.7. Trei geometrii diferite, având concentratori cu aceeași rază

Racordarea între secțiunile de dimensiuni diferite din figura 4.7a se poate realiza prin îndepărtarea de material, figura 4.7b. În aceste condiții valoarea pentru K_t se reduce cu 25%. Geometria cu rază de racordare induce mai puține distorsiuni decât cea cu canal lateral. Este de așteptat ca traiectoriile tensiunilor principale să fie mai puțin distorsionate în cazul concentratorului de tip rază de racordare. În figura 4.7c concentratorul este format prin îndepărtarea de material din ambele părți, stânga și dreapta. În aceste condiții, devierea direcțiilor tensiunilor principale este mai mică decât în celelalte două cazuri, și, ca urmare, și valoarea coeficientului de concentrare a tensiunilor K_t este mai mică. Din figura 4.7 se constată că cea mai mare valoare a coeficientului de concentrare a tensiunilor K_t este dat de concentratorul lateral, de tip penetrare, care se poate obține și accidental: urme de lovituri, pittinguri, urme de la coroziune sau chiar imprimarea unor coduri de producător.

4.4. Metode pentru determinarea coeficientului de concentrare a tensiunilor

Ar fi de preferat ca determinarea concentratorului de tensiune să se facă pe cale analitică. Având în vedere complexitatea stării de tensiune cât și dificultățile geometrice din vecinătatea concentratorului de tensiune, de cele mai multe ori calculul analitic în acest caz devine prea complicat pentru a fi dus la bun sfârșit. Tehnicile pentru determinarea K_t au fost, pentru început, cele experimentale. În figura 4.8 se prezintă două exemple de determinare a coeficientului de concentrare a tensiunilor K_t prin fotoelasticimetrie. Câmpul de izotensiuni se

află la interferența zonelor negre cu cele albe, numite franje. Pentru bara orizontală din *figura 4.8b*, supusă la încovoiere, paralelismul franjelor luminoase indică o aceeași distribuție a tensiunilor. Se constată că un vârf al tensiunii se stabilește la trecerea de la o secțiune la alta. Avantajul metodei constă în faptul că se poate obține câmpul tensiunilor de pe întreaga suprafață. Dezavantajul îl constituie acuratețea metodei.

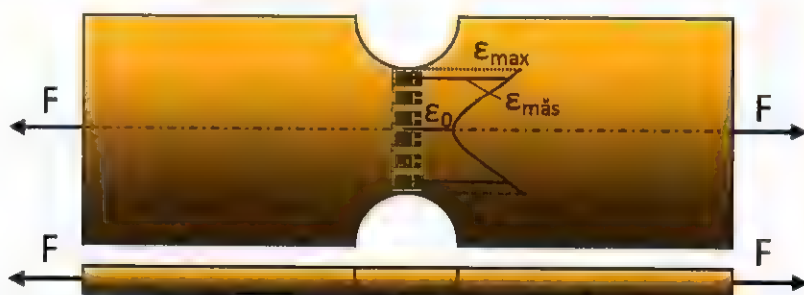


a) concentrator circular - tracțiune

b) rază de racordare - încovoiere

Fig. 4.8. determinarea K_t prin fotoelasticimetrie

O altă metodă în vederea determinării coeficientului de concentrare a tensiunilor îl reprezintă tehnica utilizării traductoarelor tensometrice, *figura 4.9*. În acest caz, deformațiile din punctul central al traductorului se măsoară cu o bună acuratețe. Totuși, datorită gradientului mare al tensiunilor din imediata vecinătate a concentratorului de tensiune, trebuie utilizat un traductor electrotensometric cu dimensiunile grilei foarte mici, $L, l < 1\text{mm}$. Din păcate, nu se poate măsura cu ajutorul acestei metode, deformația, și în acest fel să se determine tensiunea, la marginea concentratorului, acolo unde, de altfel, avem un maxim în ceea ce privește deformația și, ca urmare, tensiunea. În general, această metodă se poate utiliza pentru determinarea deformațiilor în cazul structurilor sau a componentelor cu geometrie complexă. Așa cum se poate constata din *figura 4.9* se recomandă ca în vecinătatea concentratorului să se utilizeze un lanț de traductori electrotensometrici.

Fig. 4.9. Determinarea K_t prin tehnica utilizării traductoarelor tensometrice

În afară de datele privind similitudinea concentratorilor (în special cea a razelor), pentru estimarea valorilor K_t se poate utiliza și metoda interpolării rezultatelor între diferite geometrii pentru care există valori disponibile. Această estimare se poate face, întrucât există

date disponibile în acest sens în literatura de specialitate. Se pot utiliza date determinate prin diferite metode. Având în vedere acest lucru acuratețea acestei metode este limitată.

Metoda cel mai des utilizată actualmente este cea bazată pe analiza cu elemente finite, AEF. O ilustrare a modelului utilizat în acest sens este prezentată în *figura 4.10*. Geometria modelului trebuie să conțină un număr suficient de mare de elemente interconectate. În zona concentratorului de tensiune trebuie asigurată o densitate mai mare a elementelor utilizate.

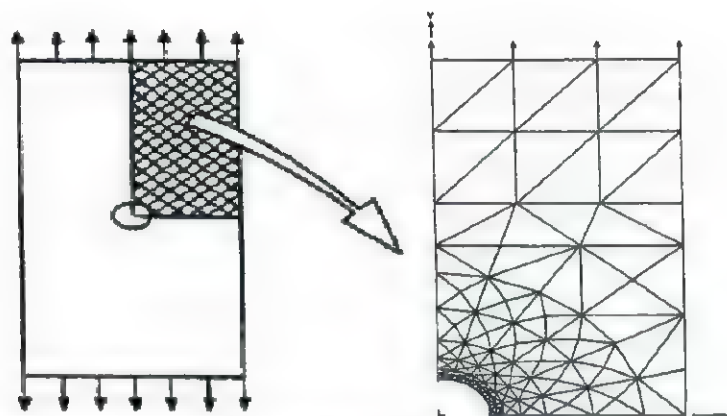


Fig. 4.10. Modelul utilizat în analiza cu elemente finite

Pentru forme complexe ale structurilor sau componentelor, metodele de calcul analitic și estimările devin impracticabile. Acest lucru este valabil pentru componentele cu geometrie 3D ce conține multe elemente dar și pentru componentele 2D cu o geometrie complexă, simetrie limitată și fără elemente comparabile simple. În cazul în care, pentru determinarea K_t , nu sunt disponibile tehnici experimentale, trebuie aplicate tehnici de analiză cu elemente finite pentru care s-au dezvoltat mai multe programe specializate. Soluțiile obținute nu sunt exacte, deoarece materialul continuum este înlocuit de un material multi-element. Cu toate acestea, pe baza acestei metode se pot obține rezultate destul de satisfăcătoare. Analiza cu elemente finite necesită o anumită experiență a utilizatorului și, de asemenea, trebuie făcută o analiză critică a rezultatelor obținute. O atenție deosebită trebuie acordată modelării, aplicării sarcinilor, condițiilor la limită impuse și, eventual, condițiilor ce derivă din simetria geometrică și de solicitare. De asemenea, trebuie utilizat programul pe calculator cel mai adecvat problemei propuse spre a fi rezolvate. Programul respectiv trebuie verificat mai întâi pe modele simple pentru care sunt disponibile rezultate furnizate pe alte metode. Criteriile ce trebuie avute în vedere pentru o comparație între calculele AEF și tehnicile experimentale sunt: precizia și raportul cost - eficiență. În cazul în care se utilizează programe de analiză cu elemente finite care furnizează rezultate verificate și, de asemenea, operatorul acestora are destulă experiență, criteriile menționate sunt în favoarea utilizării metodei AEF. Pe de altă parte, această metodă furnizează imagini destul de elocvente privind distribuția tensiunilor din imediata vecinătate a concentratorului de tensiune. Desigur, aceasta necesită un program de calculator și un computer adecvat pentru probleme complexe 3D. Pentru validarea rezultatelor furnizate de programele de AEF, este bine să se utilizeze tehnici complementare cum ar fi determinarea deformațiilor pe baza tensometriei electrice rezistive. Aceste determinări se pot face în jurul unui punct determinat de intersecția elementelor finite.

4.5. Efectul concentrării tensiunilor la solicitări de oboseală

Similitudinea și efectul de concentrator

Prezența concentratorilor de tensiune reduce rezistența structurilor, atât în regim static cât și în regim dinamic de solicitare. Pentru solicitarea statică, efectul de concentrare a tensiunilor elastice este luat în calcul cu ajutorul coeficientului de concentrare K_t definit de relația $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n$ ca fiind raportul dintre valoarea maximă a tensiunii ce se înregistrează în imediata vecinătate a concentratorului și tensiunea nominală din secțiunea respectivă, obținute cu relațiile de calcul obișnuite din rezistența materialelor. Acest coeficient depinde de geometria concentratorului, de modul de solicitare și de felul în care a fost definită tensiunea nominală; el nu depinde de material și nici de valorile sarcinilor aplicate. Utilizarea coeficientului de concentrare statică nu este permisă dacă în zonă apar **deformații plastice locale**.

Este evident că prezența unui concentrator de tensiune va reduce rezistența la oboseală a unei piese. Pe de altă parte, se cunoaște că, epruvetele similare, din același material, cu același K_t , cu dimensiuni și raze de curbă ale concentratorului exterior mai mari, au limita la oboseală mai mică. Din acest punct de vedere se remarcă efectul mărimii concentratorului asupra rezistenței la oboseală. Pentru a înțelege și a prezice efectul formei concentratorului și efectul dimensiunii acestuia asupra limitei la oboseală, trebuie reamintită definiția limitei la oboseală. Aceasta reprezintă cea mai mică amplitudine a tensiunii, pentru care epruveta confecționată din materialul studiat nu se rupe pentru un număr N_0 specificat de cicluri de solicitare. Pentru un număr de cicluri de solicitare $N > N_0$ pentru care epruveta se rupe sau pentru o tensiune de solicitare mai mare decât limita la oboseală pentru care, din nou, epruveta se rupe, din material se va amorsa o fisură ce se va propaga până la rupere. În imediata vecinătate a fisurii propagate, pentru majoritatea materialelor metalice, se introduc deformații plastice semnificative.

O metodă utilizată pentru punerea în evidență a efectului concentrării tensiunilor asupra rezistenței la oboseală este următoarea: se trasează curba de durabilitate $\sigma_a - N$ pentru o epruvetă fără concentrator. Se împart ordonatele curbei la coeficientul de concentrare K_t obținând astfel o curbă teoretică de durabilitate $\sigma_{ak} - N$ pentru epruveta cu concentrator, solicitată în aceleași condiții ca și epruveta netedă. Repetând operațiunea pentru mai multe valori ale lui K_t se constată că, pe măsură ce valoarea coeficientului K_t crește, curba teoretică de durabilitate coboară. Dacă pentru o valoare dată a coeficientului K_t se determină pe cale experimentală curba de durabilitate $\sigma_{ak} - N$, se constată că aceasta este situată între curba teoretică și curba obținută pentru epruveta netedă. Rezultă că, un concentrator de tensiune reduce rezistența la oboseală într-o măsură mai mică decât estimarea făcută pe baza utilizării coeficientului teoretic de concentrare statică, K_t . Ca urmare, utilizarea acestui parametru în calculul de oboseală conduce la erori inacceptabile.

În figura 4.11 se prezintă curbele la oboseală prin încovoiere rotativă, pentru un aliaj din aluminiu pentru care dimensiunea probei fără concentrator ($K_t=1$) este egală cu dimensiunea minimă a piesei cu concentrator, d.

Curba $K_t=1$ este trasată pentru încercarea la oboseală a unei probe fără concentrator. Curba $K_f=2,2$ este trasată pentru încercarea la oboseală a unei probe cu concentrator (în aceleași condiții cu cea anterioară) pentru care K_f a rezultat ca fiind:

$$K_f = \frac{\sigma_{lim-fara\ Conc.}}{\sigma_{lim-cu\ Conc.}}$$

Curba $K_t=3,1$ este rezultată prin împărțirea ordonatelor obținute pentru curba $K_t=1$ la valoarea concentratorului reprezentat de canalul exterior, respectiv $K_t=3,1$.

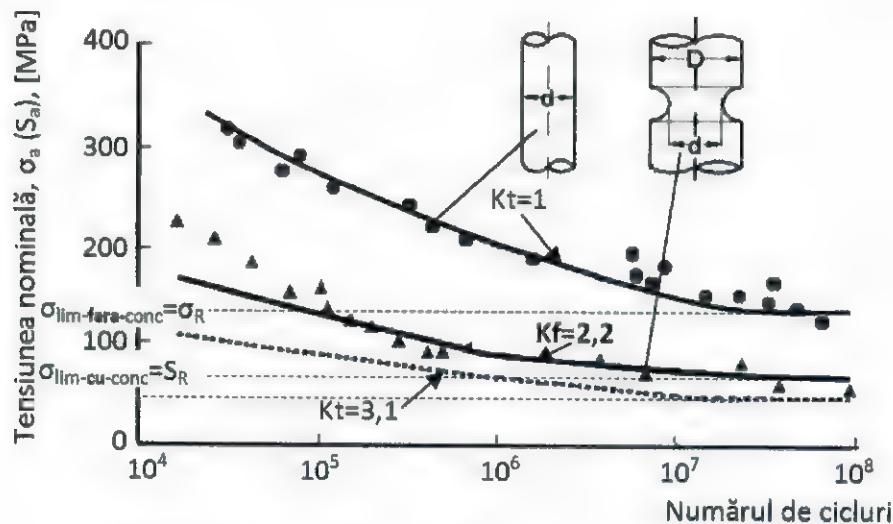


Fig. 4.11. Influența efectului de concentrare a tensiunilor

Se constată că, reducerea rezistenței la oboseală în cazul probei cu concentrator **nu are loc proporțional cu coeficientul de concentrare a tensiunilor pentru solicitarea statică, K_t** . Rezistența la oboseală a piesei cu concentrator este mai mare decât cea care s-ar obține din raportarea rezistenței la oboseală a piesei fără concentrator la K_t .

În cazul solicitărilor la oboseală, efectul de concentrare a tensiunilor nu se ia în considerare prin K_t ci prin **K_f numit coeficient efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală**.

În domeniul durabilităților mari, diminuarea rezistenței la oboseală datorată efectului de concentrare a tensiunilor poate fi evaluată cu ajutorul factorului de reducere a rezistenței la oboseală K_f ; pentru acest parametru se mai utilizează în literatura de specialitate și denumirea de factor de oboseală al concentratorului sau **coeficient efectiv de concentrare la oboseală**. Pentru o durabilitate dată, acest factor se definește ca fiind:

$$K_f = \frac{\sigma_R}{S_R} \quad (4.6)$$

în care σ_R reprezintă limita la oboseală pentru o epruvetă **fără concentrator** iar S_R reprezintă limita la oboseală pentru o epruvetă **cu concentrator**. De regulă, factorul K_f se definește și se determină pentru ciclul simetric. Se observă că structura relațiilor cu care au fost definiți

coeficienții de concentrare K_f și K_t este aceeași din punct de vedere simbolic. Diferența constă în faptul că, în timp ce coeficientul K_t este definit ca **raportul a două tensiuni**, factorul K_f reprezintă **raportul a două rezistențe la oboseală**, determinate pentru aceeași durată de viață.

Dacă raza de racordare de la vârful concentratorului este mare, valorile factorului K_f se apropie mult de cele ale coeficientului K_t . La valori mici ale razei de racordare avem $K_f < K_t$. O cauză posibilă a acestui comportament poate fi curgerea inversă ce se produce la rădăcina concentratorului în timpul fiecărei încărcări ciclice; deformările plastice care apar astfel, conduc la o valoare reală a amplitudinii tensiunii locale maxime mai mică decât $(K_t \cdot \sigma_a)$, valoare dedusă presupunând o comportare elastică a materialului. Aceste efecte apar la majoritatea metalelor de uz ingineresc, dacă tensiunile aplicate au valori ridicate adică în cazul duratelor de viață scurte. La metalele foarte ductile aceste efecte pot apărea și la durate mici de viață. Totuși, la majoritatea materialelor curgerile sunt mici sau lipsesc chiar și la durabilități de 10^6 sau 10^7 cicluri. O altă cauză ar putea fi aceea că materialul este mai puțin sensibil la vârfurile de tensiune decât la tensiunile care acționează în zone cu dimensiuni mici dar finite. De aici rezultă necesitatea ca studiul procesului de deteriorare produs prin oboseală să se facă luând în considerare un volum finit de material. Ca urmare, tensiunea ce determină inițierea deteriorării prin oboseală este tensiunea cea mai mare; ea are o valoare mai coborâtă și se produce la o anumită distanță de punctul cel mai solicitat.

Pentru a caracteriza intensitatea efectului de concentrare produs de un concentrator de tensiune, se folosește uneori **coeficientul de sensibilitate la oboseală a concentratorului**, definit cu relația:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (4.7)$$

Dacă $K_f = K_t$, coeficientul de sensibilitate la oboseală al concentratorului are valoarea $q=1$ iar concentratorul are efectul maxim posibil. Valoarea coeficientului q scade atunci când $K_f < K_t$. Pentru $K_f = 1$, se obține valoarea minimă $q=0$, caz în care concentratorul nu are efect. S-a stabilit că valoarea coeficientului de sensibilitate q depinde de material și că, pentru un material dat, acesta crește odată cu raza de racordare a concentratorului. La unele materiale, cum sunt oțelurile, q crește de asemenea cu rezistența statică σ_u . Experimental se constată că pentru materialele fragile solicitate la oboseală, efectul de concentrare a tensiunilor este mult mai sever decât la materialele ductile de mică rezistență. Valoarea coeficientului de sensibilitate la oboseală poate fi estimată cu relația:

$$q = \frac{1}{1 + \alpha \rho} \quad (4.8)$$

în care α este o constantă de material având dimensiunea unei lungimi iar ρ este raza de racordare a concentratorului. Pentru oțeluri având rezistența la rupere statică $\sigma_u > 550$ MPa, constanta α poate fi determinată cu relația:

$$\alpha = 6 \left(\frac{100}{\sigma_u} \right)^{1,8} \quad (4.9)$$

O altă relație empirică utilizată pentru calculul coeficientului de sensibilitate la oboseală este:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}} \quad (4.10)$$

Această relație reprezintă o formă simplificată a relației lui Neuber. Pentru oțelurile cu $\sigma_u \leq 1500$ MPa, constanta de material β se poate calcula cu relația:

$$\beta = \frac{1,7}{\frac{\sigma_u}{10^{586}}} \quad (4.11)$$

Relațiile (4.9) și (4.11) sunt aproximative, iar relația (4.10) reflectă tendința observată la datele experimentale obținute pentru piesele solicitate la oboseală prin cicluri simetrice. Factorul de concentrare la oboseală K_f este un parametru empiric; el depinde de material, de forma și dimensiunile concentratorului precum și de modul de solicitare.

Întrucât coeficientul K_f se determină experimental pentru ciclurile simetrice, utilizarea lui la ciclurile având tensiunea medie nenulă presupune introducerea unor condiții. Dacă se presupune că tensiunea maximă locală, produsă în zona concentratorului la vârf de sarcină, este mai mică decât limita de curgere a materialului, atunci amplitudinea tensiunii, σ_a , și tensiunea medie σ_m , din punctul cel mai solicitat al concentratorului se pot scrie sub forma:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= K_t \sigma_{as} \\ \sigma_m &= K_f \sigma_{ms} \end{aligned} \quad (4.12)$$

în care σ_{as} și σ_{ms} reprezintă amplitudinea tensiunii, și tensiunea medie pentru ciclurile simetrice.

Efectul tensiunii medii poate fi estimat utilizând o relație de forma ecuației (3.23), exprimată în funcție de tensiuni, respectiv:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (4.13)$$

în care σ_a și σ_m corespund ciclului cu coeficient de asimetrie R iar σ_{as} corespunde unui ciclu simetric. Înlocuind relațiile (4.12) în relația (4.13) se obține amplitudinea tensiunii locale maxime, echivalentă ciclului simetric:

$$\sigma_{as} = \frac{K_t \sigma_a}{1 - \frac{K_f \sigma_m}{\sigma_u}} \quad (4.14)$$

Luând în considerație efectul de sensibilitate al concentratorului, se poate înlocui K_t prin K_f , astfel încât se obține:

$$\sigma_{as} = \frac{\sigma_a}{\frac{1}{K_f} - \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (4.15)$$

Această relație este prezentată grafic în figura 3.14, atât pentru cazul particular $K_f=1$ (concentrator inexistent sau ineficient) cât și pentru cazul general, ținând seama că $S_{as} = \sigma_{as}/K_f$.

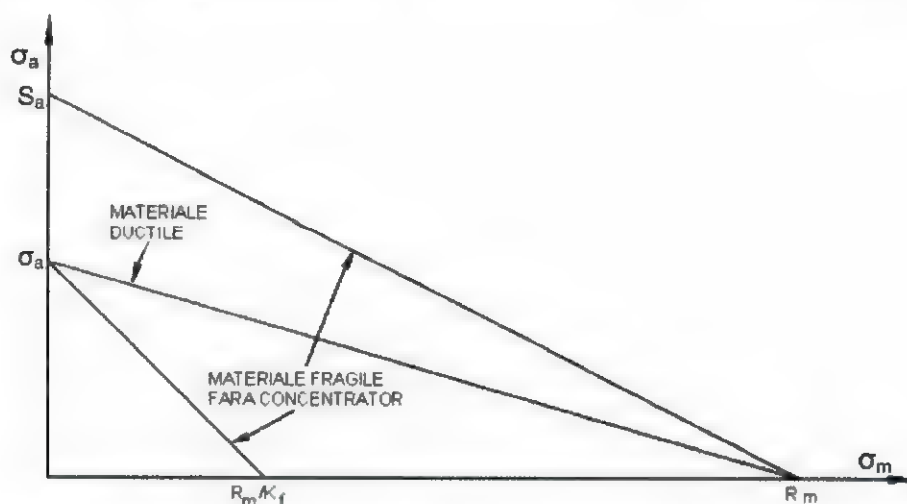


Fig. 4.6. Reprezentarea grafică a relației 4.15

Diagramele obținute pot fi folosite la calculul pieselor confecționate din materiale fragile. Pentru materialele ductile, prezența factorului K_f la numitorul relației (4.14) nu este justificată întrucât, din cauza deformațiilor plastice mari care se produc înainte de rupere, atât la epruvetele cu concentrator cât și la cele fără concentrator se obține aceeași valoare a rezistenței de rupere statică R_m . Ca urmare, la aceste materiale diagrama funcției $\sigma_{as}=f(\sigma_a, \sigma_m)$ este cea prezentată în figura 4.6.

La durate de viață scurte sau intermediare, în materialele ductile se produc curgeri importante, astfel că, amplitudinea tensiunii locale σ_a este mai mică decât $(K_f \cdot \sigma_a)$. În consecință, raportul dintre rezistența la oboseală a epruvetei cu concentrator și cea a epruvetei netede devine mai mic decât K_f , astfel încât este necesară definirea unui factor de concentrare K'_f variabil cu numărul de cicluri parcurs până la rupere:

$$K'_f = \frac{\sigma_{as}}{S_{as}} \quad (4.16)$$

La materialele ductile K'_f descrește de la valoarea K_f corespunzătoare durabilităților mari la valori apropiate de unitate, pentru durate scurte de viață.

4.6. Influența dimensiunilor piesei asupra limitei la oboseală

Efectul dimensiunii pieselor asupra limitei la oboseală poate fi determinat pe baza încercărilor experimentale. Un astfel de exemplu este prezentat în figura 4.8a. Se constată faptul că, pentru diferite oțeluri, limita la oboseală scade pe măsură ce dimensiunile pieselor cresc.

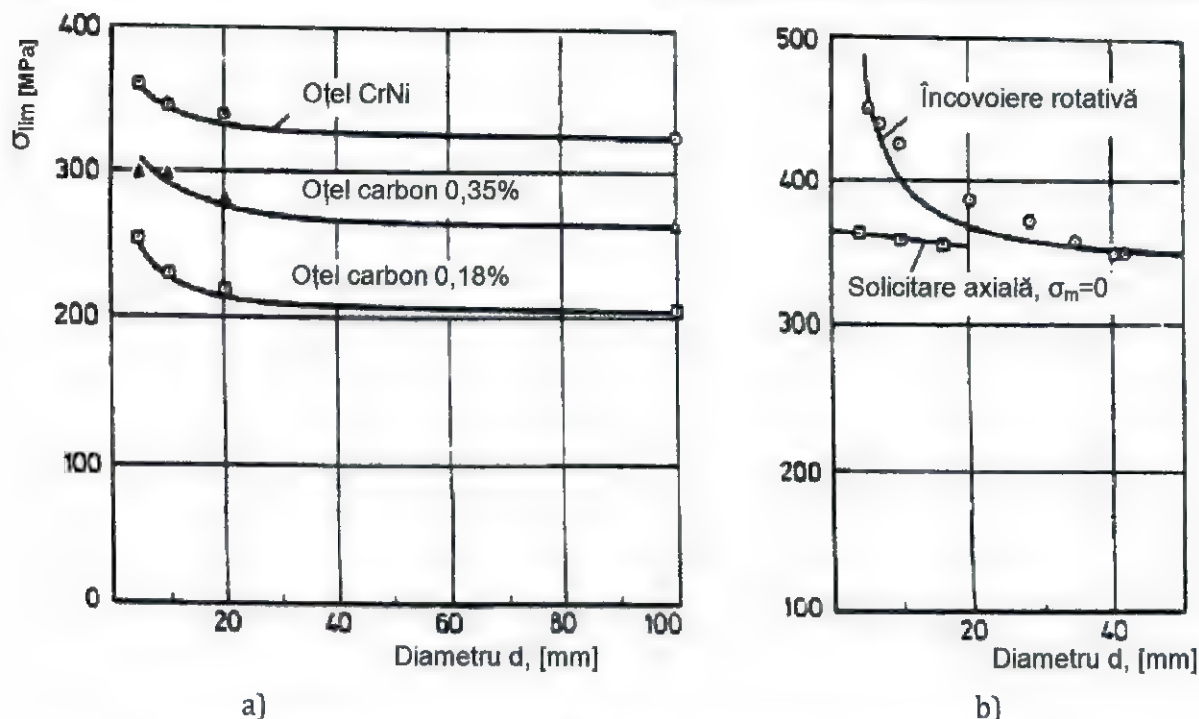


Fig. 4.8. Variația limitei la oboseală în raport cu dimensiunile pieselor

Același lucru se poate constata și din *figura 4.8b*, cu precizarea că, pentru dimensiuni mici ale pieselor, limita la oboseală este mai mare în cazul sollicitării de încovoiere rotativă în raport cu sollicitarea axială alternant-simetrică. Așa cum s-a văzut în capitolul 2, valoarea limitei la oboseală este determinată, în primul rând de defectele existente sau care se inițiază la suprafața materialului. Probabilitatea de a avea mai multe defecte este mai mare pentru materialele cu volum și suprafață mai mari. Ca urmare, rezultatele experimentale prezentate sunt explicabile, din acest punct de vedere. Pe de altă parte, la sollicitarea axială un volum mai mare de material este supus tensiunii maxime spre deosebire de sollicitarea de încovoiere unde doar în fibrele de la suprafață se introduce tensiunea maximă. Ca urmare, este explicabilă scăderea limitei la oboseală pentru sollicitarea axială, *figura 4.8b*.

Efectul dimensiunilor piesei asupra rezistenței la oboseală se estimează pe baza coeficientului adimensional ε , definit ca raportul dintre limita la oboseală a unei epruvete de dimensiune D oarecare și limita la oboseală a unei epruvete de dimensiune d , standard:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{RD}}{\sigma_{Rd}}$$

Dacă se încearcă epruvete cilindrice, dimensiunea standard este de obicei 10 mm. În cele două cazuri încercarea se face cu același coeficient de asimetrie, de obicei $R=-1$ (solicitare după un ciclu simetric). În *figura 4.9* se prezintă o diagramă care prezintă curbele de variație a coeficientului ε în funcție de dimensiunile epruvetelor, pentru diferite tipuri de oțeluri.

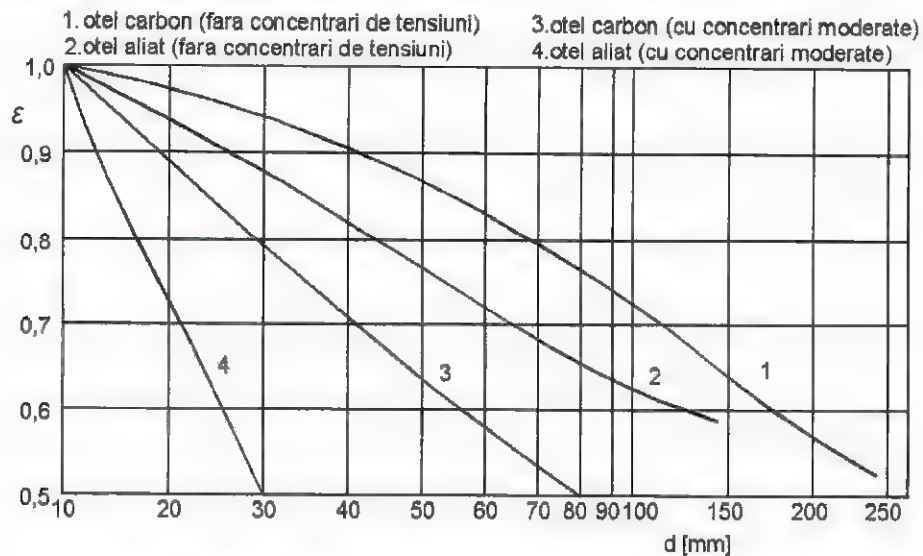


Fig. 4.9. Curbele de variație a coeficientului ε în funcție de dimensiunile epruvetelor

Pentru explicarea teoretică a influenței dimensiunilor asupra limitei la oboseală au fost propuse mai multe modelări. Unele dintre acestea țin seama de probabilitatea ca într-un anumit volum să existe un anumit număr de defecte sau să se inițieze deplasări ale dislocațiilor care să conducă la apariția defectelor. Dacă se consideră că densitatea de defecte pe unitatea de volum este constantă, odată cu creșterea volumului crește și probabilitatea existenței unui defect critic de la nivelul căruia să se propage în continuare o fisură până la rupere. Pe baza acestor considerații s-a propus a fi utilizată relația:

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{C \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right)} \quad (4.17)$$

în care C este o constantă de material, V este volumul epruvetei cu dimensiune oarecare iar V_0 este volumul epruvetei standard.

Alte relații de calcul țin seama de raportul dimensiunilor maxime ale celor două epruvete:

$$\varepsilon = \left(\frac{d_0}{d}\right)^r \quad (4.18)$$

unde r reprezintă o constantă de material, pentru oțeluri cuprinsă între 0,08 și 0,12.

4.7. Influența calității suprafeței asupra limitei la oboseală

Calitatea și în special rugozitatea suprafețelor au un efect semnificativ asupra inițierii fisurilor de oboseală. Pentru condițiile de producție industrială o suprafață de înaltă calitate este scumpă și nu neapărat necesară. În funcție de procesele de producție există o varietate de calități ale suprafeței. Calitatea suprafeței este caracterizată de termeni ca lustruire, rectificare, șlefuire, strunjire, frezare pe contur, găurire, tăiere, turnare, forjare, extrudare, etc.

Efectul diferitelor condiții de finisaj ale suprafeței asupra curbei σ -N și a limitei de oboseală a fost determinat pe baza a numeroase investigații experimentale asupra diferitelor materiale, în special pentru oțeluri. Efectele calității suprafeței asupra rezistenței la oboseală sunt date de coeficientul de calitate a suprafeței, sau factor de reducere, notat cu γ și definit ca raportul dintre limita la oboseală a unei epruvete având o calitate oarecare a suprafeței și limita la oboseală a epruvetei șlefuite prin rectificare:

$$\gamma = \frac{\sigma_{R, \text{oarecare}}}{\sigma_{R, \text{rectificare}}} \quad (4.19)$$

În literatura de specialitate sunt prezentate date în legătură cu valorile pentru coeficientul γ în raport cu calitatea suprafețelor, în special pentru probele din oțel, și în funcție de tensiunea de rupere la tracțiune a materialului din care sunt confecționate aceste probe, figura 4.10.

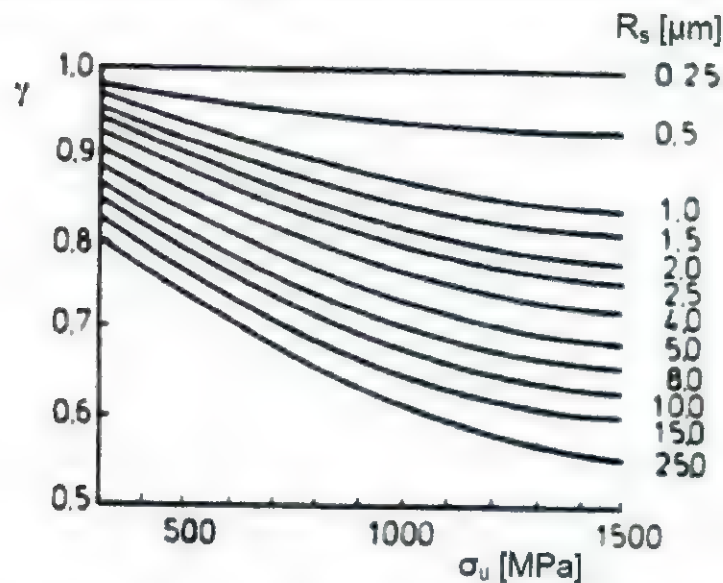


Fig. 4.10. Variația factorului γ în funcție de rugozitatea suprafeței (R_a)

Se poate constata influența calității suprafeței asupra factorului γ , acesta putând ajunge și la valori de 0,5 se poate vedea, de asemenea, și faptul că factorul γ scade pe măsură ce rezistența la rupere prin tracțiune crește. Problema care se pune este dacă trebuie să suprapunem efectul calității suprafețelor peste efectul dat de concentratorii de tensiuni existenți pe piesele reale? Rugozitatea reprezintă concentratori microscopici în timp ce găurile, racordările, canalele de pană, etc. au dimensiuni macroscopice. O suprapunere a acestor efecte ar însemna calculul coeficientului de concentrare a tensiunilor după o relație de forma:

$$K_t = (K_t)_{\text{concentrator}} \cdot (K_t)_{\text{rugozitate}} \quad (4.20)$$

Cu toate acestea, nu este realist să se definească un K_t pentru rugozitățile apărute după prelucrarea unei suprafețe. Razele la rădăcina rugozităților ar fi foarte mici, și, ca urmare, valorile pentru K_t ar trebui să fie destul de mari. Pe de altă parte, este cunoscut din experiența în exploatare, că rugozitatea suprafeței poate reduce în mod semnificativ calitatea la oboseala

a unui element de structură sau a unui material de înaltă rezistență. Predicțiile asupra limitei la oboseală a unei structuri cu raze mari ale creștăturilor de la suprafață trebuie să includă un factor de reducere γ care să țină seama de calitatea suprafeței:

$$\sigma_1 = (\sigma_1)_{\text{prezis}} \cdot \gamma \quad (4.21)$$

cu γ determinat din *figura 4.10*, de exemplu.

Observații;

- în cazul materialelor de înaltă rezistență, la care și limita la oboseală este ridicată, trebuie să țină seama totuși de sensibilitatea mai ridicată a acestora în raport cu calitatea suprafeței;
- informațiile privind efectul calității suprafeței asupra limitei la oboseală este dat de factorul γ , totuși, în cadrul proiectării la oboseală sunt necesare mai multe informații în legătură cu acest aspect. Câteva dintre aceste sunt redate în continuare.

Sunt procese care au un efect favorabil sau defavorabil asupra coeficientului de calitate a suprafeței. Dacă stratul superficial al piesei se îmbunătățește prin diverse tratamente termice, termochimice sau mecanice, coeficientul γ se va îmbunătăți. O serie de procese tehnologice cum ar fi laminarea sau anumite tratamente termice cum ar fi recoacerea, au efecte defavorabile asupra proprietăților materialului din straturile superficiale ale pieselor. De asemenea, mai este cunoscut faptul că, la suprafețele materialelor mai moi, fisurile se amorsează mai ușor decât în cazul suprafețelor mai dure.

Bibliografie

CAPITOLUL 5. CALCULUL LA OBOSEALĂ

5.1. Coeficientul de siguranță la oboseală

5.2. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării diagramei ciclurilor limită

5.3. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Soderberg

5.4. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Goodman

5.5. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Serensen

5.1. Coeficientul de siguranță la oboseală

Calculul la oboseală ale organelor de mașini sau ale structurilor se fac pe baza diagramelor ciclurilor limită. Acestea, respectiv schematizările lor se obțin pe baza diagramelor ciclurilor limită și a schematizările acestora trasate pentru epruvete, corectate cu ajutorul unor factori de influență asupra limitei la oboseală. În general, acești factori se cunosc abia după dimensionare și stabilirea formei constructive a piesei. Pe de altă parte, acești factori intervin în relațiile de calcul la oboseală. Ca urmare, în cazul dimensionării pieselor solicitate la oboseală cu ajutorul metodelor rezistenței clasice, se adoptă rezistențe admisibile mai mici.

Calculul la oboseală este, în primul rând, unul de verificare. El se poate efectua după alegerea tuturor dimensiunilor piesei și a tehnologiei de fabricație. Verificarea la solicitarea de oboseală constă în primul rând din calculul coeficientului de siguranță al solicitării produse în secțiunile periculoase ale piesei. Pentru ca piesa calculată să reziste la oboseală trebuie ca în fiecare secțiune periculoasă să se obțină un coeficient de siguranță mai mare decât cel prescris în memoratoarele ingineresti pentru cazul considerat. În *tabelul 5.1* sunt prezentate câteva exemple informative privind valorile coeficientului de siguranță, pentru diferite piese.

Tab. 5.1. Valori ale coeficienților de siguranță [Deutch]

Nr. crt.	Felul pieselor și materiale	Valoarea coeficientului de siguranță
1	Piese de mașini, din oțel	1,5 + 1,7
2	Piese de mașini ușoare, din oțel	1,3 + 1,4
3	Piese importante, din oțel, cu încercarea la oboseală pe piesă	1,35
4	Piese din oțel turnat	1,4 + 2,0
5	Piese din fontă	2,0 + 3,0
6	Piese din aliaje de cupru	2,0 + 2,7
7	Piese din aliaje ușoare	2,0 + 2,5

Se definește drept coeficient de siguranță la solicitarea de oboseală, raportul dintre **rezistența la oboseală a piesei** și tensiunea maximă (sau amplitudinea) produsă în piesă:

$$c_{\sigma} = \frac{S_{\max L}}{\sigma_{\max}}; \quad c_{\sigma} = \frac{S_{\max L}}{\sigma_{\text{am}}} \quad (5.1)$$

în care:

- $S_{\max L}$ reprezintă rezistența la oboseală a piesei;
- $\sigma_{\max (\text{am})}$ reprezintă tensiunea maximă (amplitudinea) calculată pentru piesă.

Limita la oboseală, σ_R , se determină pe epruvete normalizate, fără concentratori de tensiune, cu diametrul $d_0=10$ mm și cu suprafața șlefuită. **Rezistența la oboseală** a piesei diferă de limita la oboseală a epruvetei deoarece piesa poate avea concentratori, alte dimensiuni și altă calitate a suprafeței. Ca urmare, rezistența la oboseală a piesei se poate exprima în funcție de limita la oboseală a epruvetei prin intermediul coeficientului efectiv de concentrare a tensiunilor K_f , a factorului dimensional ε și a coeficientului de calitate a suprafeței γ :

$$S_{\max L} = \frac{\varepsilon \cdot \gamma}{K_f} \sigma_R \quad (5.2)$$

în care σ_R reprezintă limita la oboseală a epruvetei.

În aceste condiții, expresia pentru coeficientul de siguranță la oboseală se poate scrie sub forma:

$$c_{\sigma} = \frac{\varepsilon \cdot \gamma}{K_f} \frac{\sigma_R}{\sigma_{\max (\text{am})}} \quad (5.3)$$

În cazul, cel mai simplu, al unei solicitări alternant-simetrice, coeficientul de siguranță la oboseală poate fi calculat cu relația:

$$c_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_f}{\varepsilon \cdot \gamma} \sigma_{\max}} \quad (5.4)$$

în care σ_{-1} este limita la oboseală a epruvetei în cazul solicitării alternant simetrice.

5.2. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării diagramei ciclurilor limită

În cazul solicitării variabile caracterizată de un coeficient de asimetrie de valoare oarecare, expresia coeficientului de siguranță depinde de:

- modul de schematizare a diagramei ciclurilor limită;
- criteriul de alegere a rezistenței la oboseală utilizată în calcule.

În *figura 5.1* se prezintă curba ciclurilor limită determinată pe epruvete, în coordonate σ_m - σ_a , precum și o solicitare variabilă oarecare reprezentată printr-un punct P.

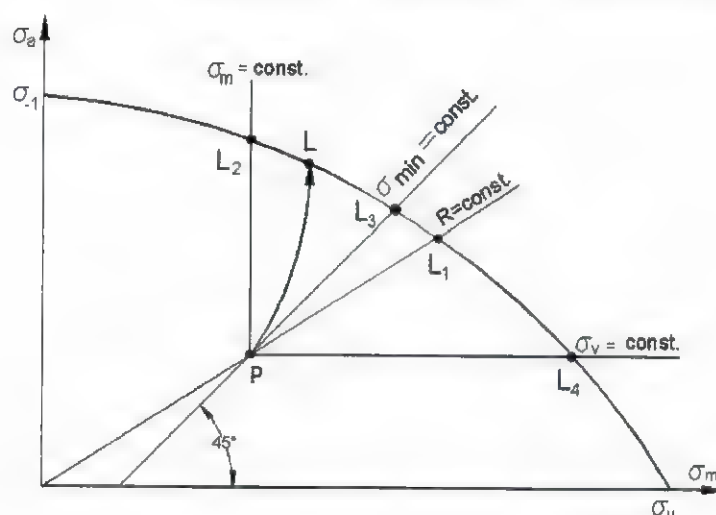


Fig. 5.1. Curba ciclurilor limită

Calculul coeficientului de siguranță se face pe baza unei raportări a solicitării piesei, reprezentate prin punctul P, la o solicitare limită a epruvetelor reprezentate prin punctul L sau L₁, L₂, L₃, L₄.

Pentru determinarea rezistenței la oboseală este recomandabil să se stabilească, dacă este posibil, modul cum ar putea să evolueze solicitarea variabilă dată. Prin reprezentarea legii de evoluție a solicitării variabile se intersectează curba ciclurilor limită și se obține punctul L, care se referă la rezistența la oboseală căutată pentru piesă. Acest mod de determinare a rezistenței la oboseală constituie criteriul lui D.N. Kimmelman. El poate avea o serie de cazuri particulare, printre care: calculul pe baza aceluiași coeficient de asimetrie, respectiv aceeași tensiune medie, tensiune minimă, etc. Pentru un anumit criteriu și pentru o anumită schematizare a curbei ciclurilor limită rezultă o anumită valoare a coeficientului de siguranță la un ciclu dat.

În cazul în care determinarea rezistenței la oboseală nu este posibilă prin încercări în laborator a pieselor, aceasta se poate determina pe baza limitei la oboseală a epruvetelor confecționate din același material ca piesa reală, cu luarea în considerare a factorilor care influențează rezistența la oboseală. De exemplu, rezistența la oboseală a unei piese solicitată după un ciclu alternant simetric se poate calcula cu relația:

$$S_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_f}{\varepsilon \cdot \gamma}} \quad (5.5)$$

În care:

- S_{-1} reprezintă **rezistența la oboseală** a unei piese solicitată după un ciclu alternant simetric;
- σ_{-1} reprezintă **limita la oboseală** a unei epruvete solicitată după un ciclu alternant simetric;
- K_f este coeficientul efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală;
- ε este factorul dimensional;
- γ este factorul ce ține cont de calitatea suprafețelor.

La numitorul relației (5.5) se pot atașa și alți factori de influență asupra rezistenței la oboseală a pieselor, care țin de: tratamentele termice aplicate, mediul de lucru, influența temperaturii, influența modului de solicitare, etc. În consecință, relația (5.5) poate fi scrisă și sub forma:

$$S_{-1} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_f}{k_g}} \quad (5.6)$$

În care k_g reprezintă un coeficient global ce cuprinde influența tuturor factorilor asupra rezistenței la oboseală a unei piese, mai puțin influența concentratorului de tensiune specificat prin K_f .

În continuare se vor prezenta o serie de calcule ale coeficientului de siguranță la oboseală pe baza unor schematizări ale diagramei ciclurilor limită.

5.3. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Soderberg

În figura 5.2 se prezintă schematizarea Soderberg pe baza căreia se poate determina coeficientul de siguranță al piesei ce lucrează la oboseală după un ciclu de solicitare având un coeficient de simetrie oarecare.

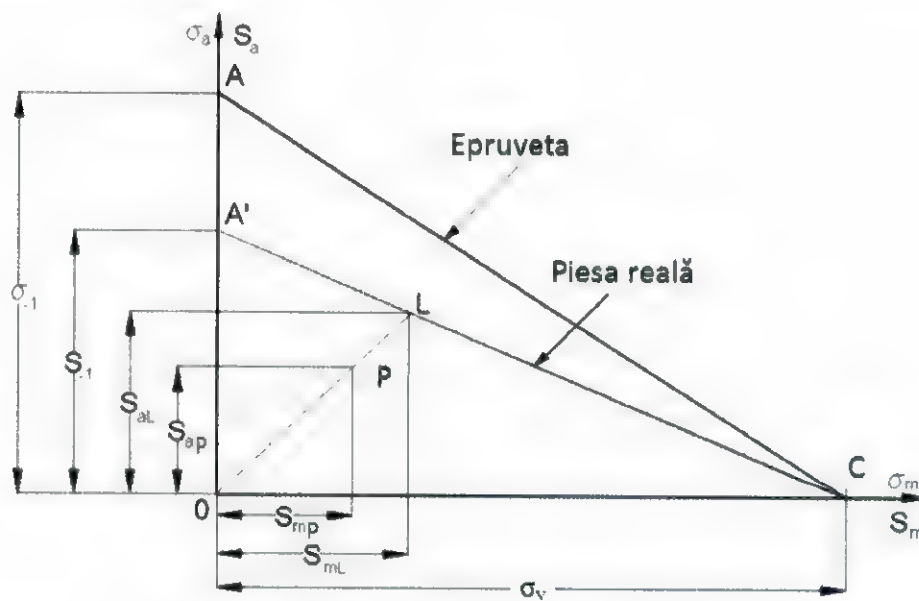


Fig. 5.2. Calculul coeficientului de siguranță la schematizarea Soderberg

Dreapta OL reprezintă ciclurile de oboseală cu același coeficient de asimetrie, R. Punctul L reprezintă valoarea limită a rezistenței la oboseală determinată pe o piesă solicitată după un ciclu cu coeficientul de asimetrie R. Punctul P reprezintă solicitarea unei piese identice cu cea de mai înainte, solicitată la valori mai mici ale tensiunii dar după un ciclu cu același coeficient de asimetrie. Având valori mai mici ale solicitării în raport cu punctul limită

L, vom avea și un anumit coeficient de siguranță pentru piesa solicitată în punctul P. Calculul acestui coeficient de siguranță se prezintă în cele ce urmează.

Coeficientul de siguranță este definit de relația:

$$c = \frac{S_{\max L}}{S_{\max P}} \quad (5.7)$$

În care $S_{\max L}$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii pentru piesa solicitată până la rupere, punctul L, iar $S_{\max P}$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii pentru piesa solicitată la valori mai mici ale tensiunii, dar după un ciclu având același coeficient de asimetrie. Prima relație din sistemul (3.2) poate fi scrisă astfel:

$$\begin{cases} S_{\max L} = S_{mL} + S_{aL} \\ S_{\max P} = S_{mP} + S_{aP} \end{cases} \quad (5.8)$$

Punctul L se regăsește la intersecția dreptelor A'C și OL de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{S_{aL}}{S_{-1}} + \frac{S_{mL}}{\sigma_c} = 1 \\ \frac{S_{mL}}{S_{mP}} = \frac{S_{aL}}{S_{aP}} \end{cases} \quad (5.9)$$

Prin rezolvarea sistemului va rezulta:

$$\begin{cases} S_{mL} = \frac{1}{\frac{S_{aP}}{S_{mP}S_{-1}} + \frac{1}{\sigma_y}} \\ S_{aL} = \frac{1}{\frac{S_{aP}}{S_{mP}S_{-1}} + \frac{1}{\sigma_y}} \cdot \frac{S_{aP}}{S_{mP}} \end{cases} \quad (5.10)$$

Dacă adunăm cele două ecuații din sistemul (5.10), și ținând cont de prima relație a sistemului (5.8), vom avea:

$$S_{\max L} = S_{mL} + S_{aL} = \left(\frac{1}{\frac{S_{aP}}{S_{mP}S_{-1}} + \frac{1}{\sigma_y}} \right) \cdot \left(1 + \frac{S_{aP}}{S_{mP}} \right) = \left(\frac{S_{\max P}}{\frac{S_{aP}}{S_{-1}} + \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) \quad (5.11)$$

În consecință, din relația (5.7) coeficientul de siguranță va fi:

$$c = \frac{S_{\max L}}{S_{\max P}} = \left(\frac{1}{\frac{S_{aP}}{S_{-1}} + \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) \quad (5.12)$$

Dacă ținem cont și de relația (5.5), coeficientul de siguranță în raport cu limita la oboseală determinată pe epruvete confecționate din același material cu al pieselor și solicitate după un ciclu cu același coeficient de asimetrie, va fi dat de relația:

$$c_{\sigma} = \left(\frac{1}{\frac{K_f S_{aP}}{\varepsilon \gamma \sigma_{-1}} + \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) \quad (5.13)$$

în care σ_{-1} și σ_y sunt: limita la oboseală după un ciclu alternant simetric respectiv limita de curgere determinate pe epruvete iar S_{aP} și S_{mP} reprezintă valorile solicitării pentru piesă. Așa cum s-a menționat, pe lângă factorii de influență ε și γ pot fi adăugați și alți factori, care dacă sunt prinși într-un coeficient global k_g , relația (5.13) devine:

$$c = \left(\frac{1}{\frac{K_f S_{aP}}{k_g \sigma_{-1}} + \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) \quad (5.14)$$

Așa după cum se știe, coeficientul efectiv de concentrare a tensiunilor, K_f , este supraunitar iar coeficientul global de influență, k_g , rezultă ca un produs a unor factori de influență subunitari. Ca urmare, atât K_f cât și k_g conduc la micșorarea coeficientului de siguranță la solicitarea de oboseală.

5.4. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Goodman

În figura 5.3 se prezintă schematizarea Goodman pe baza căreia se poate determina coeficientul de siguranță al unei piesei solicitată după un ciclu având amplitudinea S_{aM} și valoarea tensiunii medii S_{mM} , egală cu cea a ciclului limită pentru respectiva piesă: $S_{mM} = S_{mL}$.

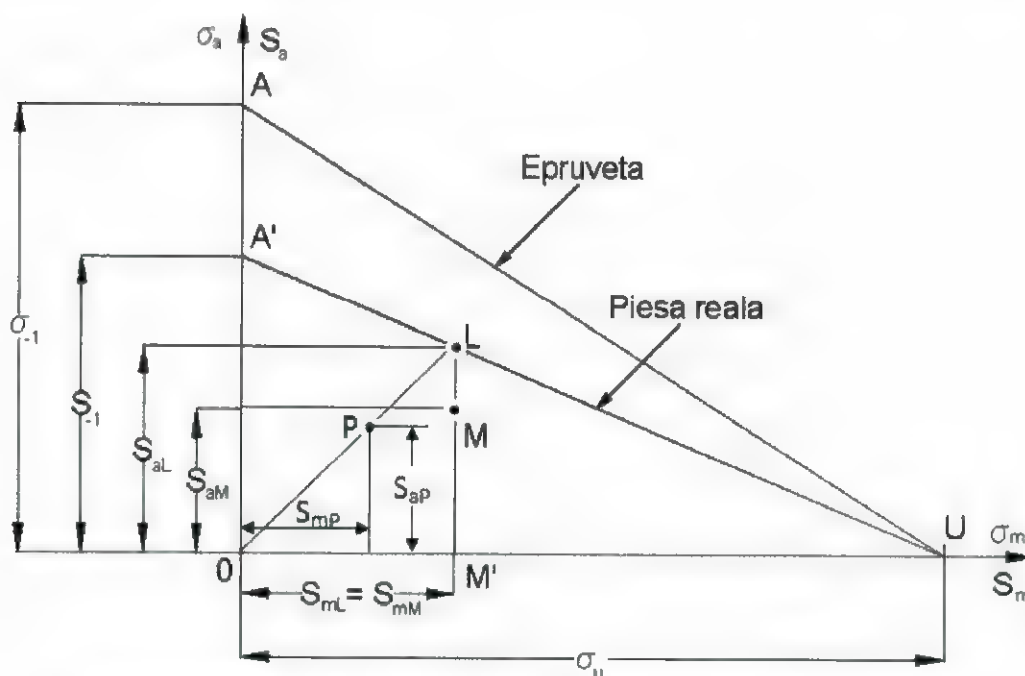


Fig. 5.3. Calculul coeficientului de siguranță la schematizarea Goodman

Relațiile (5.7) și (5.8) sunt valabile și în acest caz, respectiv:

$$c = \frac{S_{\max L}}{S_{\max M}}$$

$$\begin{cases} S_{\max L} = S_{mL} + S_{aL} \\ S_{\max M} = S_{mM} + S_{aM} \end{cases}$$

Coordonatele punctului L se găsesc prin intersecția dreptelor A'U și M'L, care sunt date de ecuațiile:

$$\begin{cases} \frac{S_{aL}}{S_{-1}} + \frac{S_{mL}}{\sigma_u} = 1 \\ S_{mL} = S_{mM} \end{cases} \quad (5.15)$$

De aici va rezulta:

$$\begin{cases} S_{mL} = S_{mM} \\ S_{aL} = \left(1 - \frac{S_{mM}}{\sigma_u}\right) \cdot S_{-1} \end{cases} \quad (5.16)$$

Conform relației (5.11) și ținând seama de prima ecuație a sistemului (5.15), tensiunea maximă a piesei solicitată până la rupere, punctul L, va fi dată de relația:

$$S_{\max L} = S_{mL} + S_{aL} = S_{mM} + \left(1 - \frac{S_{mM}}{\sigma_u}\right) \cdot S_{-1} \quad (5.17)$$

și, ca urmare, coeficientul de siguranță va rezulta:

$$c = \frac{S_{\max L}}{S_{\max M}} = \frac{S_{mM} + \left(1 - \frac{S_{mM}}{\sigma_u}\right) \cdot S_{-1}}{S_{mM} + S_{aM}} \quad (5.19)$$

Dacă ținem cont și de relația (5.5), coeficientul de siguranță în raport cu limita la oboseală determinată pe epruvete confecționate din același material cu al pieselor și solicitate după un ciclu având aceeași tensiune medie, va fi dat de relația:

$$c = \frac{S_{mM} + \left(1 - \frac{S_{mM}}{\sigma_u}\right) \cdot \sigma_{-1} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \gamma}{K_f}}{S_{mM} + S_{aM}} \quad (5.19)$$

în care σ_{-1} și σ_u sunt tensiuni determinate pe epruvete iar S_{aM} și S_{mM} reprezintă valorile solicitării pentru piesă. Dacă se dorește a se introduce mai mulți factori de influență asupra rezistenței la oboseală, cuantificați prin intermediul coeficientului global de influență, k_g , relația (5.19) devine:

$$c = \frac{S_{mM} + \left(1 - \frac{S_{mM}}{\sigma_u}\right) \cdot \sigma_{-1} \cdot \frac{K_g}{K_f}}{S_{mM} + S_{aM}} \quad (5.19)$$

Dacă solicitarea piesei se face după un ciclu de solicitare având același coeficient de simetrie (pe dreapta OL avem $R=\text{const.}$), atunci coeficientul de siguranță se determină după

un traseu asemănător schematizării Soderberg, cu deosebirea că tensiunea limită statică va fi cea pentru materiale fragile, respectiv σ_u .

$$C = \left(\frac{1}{\frac{K_f S_{ap}}{\varepsilon \gamma \sigma_{-1}} + \frac{S_{mp}}{\sigma_u}} \right)$$

5.5. Calculul coeficientului de siguranță pe baza schematizării Serensen

În figura 5.4 se prezintă schematizarea Serensen pe baza căreia se poate determina coeficientul de siguranță al piesei ce lucrează la oboseală după un ciclu de solicitare având un coeficient de simetrie oarecare. Relația pentru determinarea coeficientului de siguranță este:

$$C = \frac{S_{\max L}}{S_{\max P}} = \frac{S_{mL} + S_{aL}}{S_{mP} + S_{aP}}$$

Punctul L_1 se regăsește la intersecția dreptelor AD și OL_1 de ecuații:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{S_{aL}}{S_{-1}} + \frac{S_{mL}}{\frac{S_0 S_{-1}}{2S_{-1} - S_0}} &= 1 \\ \frac{S_{mL}}{S_{mP}} &= \frac{S_{aL}}{S_{aP}} \end{aligned} \right. \quad (5.20)$$

S-a notat și se va nota în continuare în loc de punctul P_1 , punctul P , pentru ușurința scrierii, revenindu-se la P_1 în calculul coeficientului de siguranță.

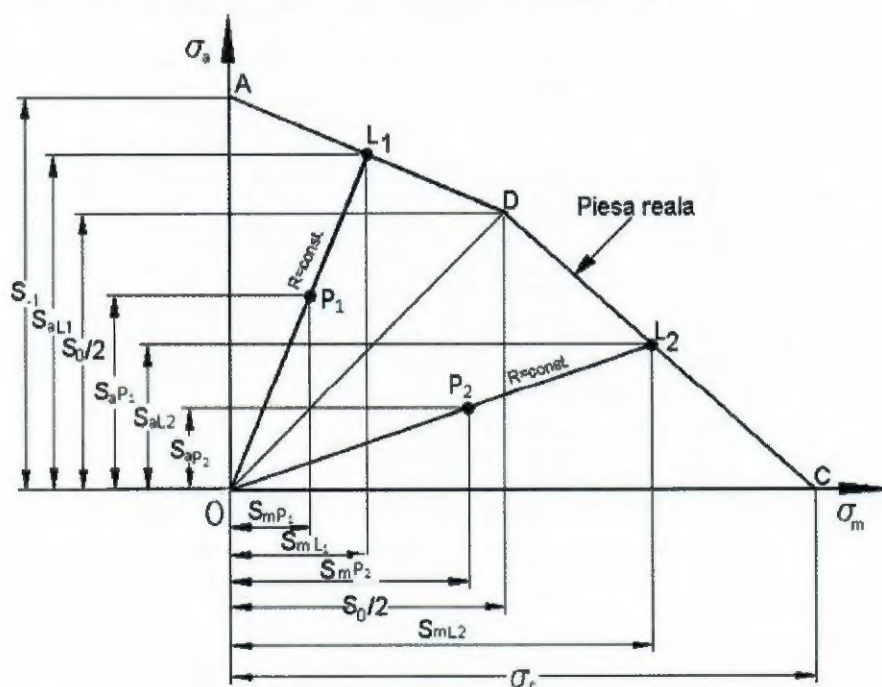


Fig. 5.4 Calculul coeficientului de siguranță la schematizarea Serensen

Prin rezolvarea sistemului va rezulta:

$$\begin{cases} S_{aL} = \frac{\frac{S_{mP}}{S_{aP}}}{\frac{1}{S_{-1}} + \frac{2S_{-1} - S_0}{S_0 S_{-1}} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \\ S_{mL} = \frac{1}{\frac{1}{S_{-1}} + \frac{2S_{-1} - S_0}{S_0 S_{-1}} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \end{cases} \quad (5.21)$$

Dacă adunăm cele două ecuații din sistemul (5.21), și ținând cont de prima relație a sistemului (5.8), vom avea:

$$S_{maxL} = S_{mL} + S_{aL} = \left(\frac{1}{\frac{1}{S_{-1}} + \frac{2S_{-1} - S_0}{S_0 S_{-1}} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{S_{mP}}{S_{aP}} \right) = \left(\frac{S_{maxM}}{\frac{S_{aP}}{S_{-1}} + \frac{2S_{-1} - S_0}{S_0} \frac{S_{mP}}{S_{-1}}} \right) \quad (5.22)$$

În consecință, din relația (5.7) coeficientul de siguranță va fi:

$$C = \frac{S_{maxL}}{S_{maxP}} = \frac{S_{mL} + S_{aL}}{S_{mP} + S_{aP}} = \left(\frac{1}{\frac{S_{aP}}{S_{-1}} + \frac{2S_{-1} - S_0}{S_0} \frac{S_{mP}}{S_{-1}}} \right) \quad (5.23)$$

Așadar, pentru zona OADO a diagramei, respectiv punctul P_1 , ținând cont și de relația (5.5), coeficientul de siguranță va avea expresia:

$$C_1 = \frac{1}{\frac{K_f}{\varepsilon \gamma} \frac{1}{S_{-1}} \left(S_{aP_1} + \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} S_{mP_1} \right)} \quad (5.24)$$

Din relația (5.23), expresia $\frac{2S_{-1} - S_0}{S_0}$ s-a transformat în relația (5.24) în expresia $\frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$ deoarece, atât pentru S_{-1} cât și pentru S_0 este valabilă relația (5.5), în consecință

apariția expresiei $\frac{K_f}{\varepsilon \cdot \gamma}$ și la numărător și la numitor conduce la simplificarea acesteia.

În consecință, coeficientul de siguranță pentru zona OADO a diagramei Serensen este în funcție de de limita la oboseală a unei epruvete confecționată din același material și supusă unui ciclu alternant – simetric, σ_{-1} , tensiunea medie și amplitudinea ciclului de solicitare al punctului (P_1), de limita la oboseală a unei epruvete confecționată din același material și supusă unui ciclu pulsant, σ_0 , precum și de factorii de influență la oboseală, respectiv: factorul de concentrare a tensiunilor, K_f , factorul reprezentând calitatea suprafeței, γ și factorul dimensional, ε .

Punctul L_2 se regăsește la intersecția dreptelor DC și OL_2 de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{S_{aL}}{\sigma_y} + \frac{S_{mL}}{S_0 \sigma_y} = 1 \\ \frac{S_{mL}}{S_{mP}} = \frac{S_{aL}}{S_{aP}} \end{cases} \quad (5.25)$$

S-a notat și se va nota în continuare în loc de punctul P_2 , punctul P , pentru ușurința scrierii, revenindu-se la P_2 în calculul coeficientului de siguranță.

Prin rezolvarea sistemului va rezulta:

$$\begin{cases} S_{mL} = \frac{\frac{S_{mP}}{S_{aP}}}{\frac{1}{\sigma_y} + \frac{2\sigma_y - S_0}{S_0 \sigma_y} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \\ S_{aL} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_y} + \frac{2\sigma_y - S_0}{S_0 \sigma_y} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \end{cases} \quad (5.26)$$

Dacă adunăm cele două ecuații din sistemul (5.26), și ținând cont de prima relație a sistemului (5.8), vom avea:

$$S_{maxL} = S_{mL} + S_{aL} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\sigma_y} + \frac{2\sigma_y - S_0}{S_0 \sigma_y} \frac{S_{mP}}{S_{aP}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{S_{mP}}{S_{aP}} \right) = \left(\frac{S_{maxP}}{\frac{S_{aP}}{\sigma_y} + \frac{2\sigma_y - S_0}{S_0} \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) \quad (5.27)$$

În consecință, din relația (5.7) coeficientul de siguranță va fi:

$$c = \frac{S_{maxL}}{S_{maxP}} = \frac{S_{mL} + S_{aL}}{S_{mP} + S_{aP}} = \left(\frac{1}{\frac{S_{aP}}{\sigma_y} + \frac{2\sigma_y - S_0}{S_0} \frac{S_{mP}}{\sigma_y}} \right) = \left(\frac{1}{\frac{S_{aP}}{\sigma_y} + S_{mP} \left(\frac{2}{S_0} - \frac{1}{\sigma_y} \right)} \right) \quad (5.28)$$

Relația (5.5) se poate transcrie și este valabilă și astfel:

$$S_0 = \frac{\sigma_0}{\frac{K_f}{\varepsilon \cdot \gamma}} \quad (5.29)$$

Așadar, pentru zona ODCO a diagramei, respectiv punctul P_2 , ținând cont și de relația (5.29), coeficientul de siguranță va avea expresia:

$$c = \frac{1}{\frac{S_{aP_2}}{\sigma_y} + S_{mP_2} \left(\frac{2 K_f}{\sigma_0 \epsilon \gamma} - \frac{1}{\sigma_y} \right)} \quad (5.30)$$

În consecință, coeficientul de siguranță pentru zona ODCO a diagramei Serensen este în funcție de tensiunea de curgere, tensiunea medie și amplitudinea ciclului de solicitare al punctului (P_2), de limita la oboseală a unei epruvete confecționată din același material și supusă unui ciclu pulsant, σ_0 , precum și de factorii de influență la oboseală, respectiv: factorul de concentrare a tensiunilor, K_f , factorul reprezentând calitatea suprafeței, γ și factorul dimensional, ϵ .